

ACTES DE LA CONFÉRENCE INTERNATIONALE

SUR

L'UTILISATION DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE A DES FINS PACIFIQUES

AVANT-PROPOS

Les seize volumes qui contiennent tous les mémoires et comptes rendus de la Conférence internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques illustrent un cas sans précédent de coopération scientifique sur le plan international. On y trouve réunie la vaste documentation, riche en perspectives d'avenir, qui a été rendue publique pour la première fois lors de la Conférence. Les connaissances librement échangées à Genève représentent un terrain définitivement gagné dans le champ de la coopération scientifique internationale, sans laquelle les utilisations pacifiques de l'énergie atomique ne sauraient atteindre leur plein développement.

En dehors même de sa portée scientifique, la Conférence marque une date essentielle. En effet, les discussions qui ont eu lieu entre les maîtres de la science et du génie nucléaires, au sujet des nombreuses utilisations de l'énergie atomique à des fins pacifiques, est la première mesure pratique que l'on ait prise sur le plan international en vue d'exploiter la puissance des atomes pour construire au lieu de détruire. Cette initiative des gouvernements prouve leur volonté d'étendre à tous les peuples le bénéfice des possibilités de progrès que les savants mettent à la disposition de l'homme.

Les renseignements d'ordre scientifique et technique, rassemblés et présentés dans cette publication par les savants qui ont concouru à la préparation de la Conférence, constituent sans doute — à l'heure actuelle — la source d'information la plus complète qui soit condensée dans un même ouvrage de référence concernant l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques. On est en droit d'espérer que cette relation d'une étape importante sur la voie des réalisations incitera les hommes de science de tous les pays à poursuivre leur collaboration pour le bien de l'humanité.



Dag HAMMARSKJOLI

Secrétaire général
de l'Organisation des Nations Unies

Actes de la Conférence internationale

sur

l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques

Tenue à Genève
du 8 au 20 août 1955

Volume I

Besoins du monde en énergie et rôle de l'énergie nucléaire

NATIONS UNIES
Genève
1956

PUBLICATION DES NATIONS UNIES

N° de vente : 1956. IX. 1. Vol. 1

Prix : 8 dollars (E.-U.); 57/- (sterling); 34 francs suisses
(ou l'équivalent en monnaie nationale)

A/CONF. 8/3

NOTE LIMINAIRE

Les Actes de la Conférence internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques forment une série de seize volumes constitués comme suit :

Numéro du volume	Titre	Séances
I	Besoins du monde en énergie et rôle de l'énergie nucléaire	2, 3.2, 4.1, 4.2, 5, 24.2.
II	Physique et piles de recherche	6A, 7A, 8A, 9A, 10A.1.
III	Génératrices nucléaires	10A.2, 3.1, 11A, 12A, 13A, 14A.
IV	Principales sections efficaces servant à l'étude des piles	15A, 16A, 17A, 18A.
V	Physique des piles	19A, 20A, 21A, 22A, 23A.
VI	Géologie de l'uranium et du thorium	6B, 7B.
VII	Chimie nucléaire et effets des rayonnements	8B, 9B, 10B, 11B, 12B, 13B.
VIII	Matériaux : problèmes et techniques de préparation	14B, 15B, 16B, 17B.
IX	Matériaux : essai et traitement chimique	7.3, 18B, 19B, 20B, 21B, 22B, 23B.
X	Les isotopes radioactifs et les rayonnements nucléaires en médecine	7.2 (Méd.), 8C, 9C, 10C.
XI	Effets biologiques des rayonnements	6.1, 11C, 12C, 13C.1.
XII	Les isotopes radioactifs et les rayonnements ionisants en agriculture, en physiologie et en biochimie	7.2 (Agric.), 13C.2, 14C, 15C, 16C.
XIII	Problèmes juridiques, administratifs et sanitaires. Normes de sécurité	4.3, 6.2, 17C, 18C.
XIV	Les isotopes radioactifs : problèmes généraux et dosimétrie	7.1, 19C, 20C.
XV	Les isotopes radioactifs et les produits de fission dans la recherche et l'industrie	21C, 22C, 23C.
XVI	Séances générales, conférences spéciales et répertoire des Actes	1, 24.1, 24.3.

Ces volumes comprennent tous les mémoires présentés à la Conférence de Genève. Les secrétaires scientifiques en ont revu le texte en s'attachant avant tout à l'exactitude scientifique. On a modifié les titres de certains mémoires pour qu'ils en reflètent mieux le contenu.

Les principaux rédacteurs responsables de la préparation de ces volumes sont : Robert A. Charpie, Donald J. Dewar, André Finkelstein, John Gaunt, Jacob A. Goedkoop, Elwyn O. Hughes, Leonard F. Lamerton, Aleksandar Milojević, Clifford Mosbacher, César A. Sastre et Brian E. Urquhart.

Les comptes rendus sténographiques des séances tenues lors de la Conférence figurent dans les volumes correspondants. Ces comptes rendus comportent les rectifications apportées par les participants et, le cas échéant, les corrections d'ordre scientifique effectuées par les secrétaires scientifiques, lesquels ont également inséré les clichés, les diagrammes et les croquis aux endroits appropriés. Dans les comptes rendus, les clichés portent des numéros qui se suivent du début à la fin de chaque séance dans l'ordre où les clichés ont été présentés. Quand un cliché n'est que la répétition d'une figure qui se

trouve dans le mémoire examiné, on l'a indiqué dans le texte, et l'illustration en question ne réapparaît pas dans le compte rendu de la séance.

Le volume XVI : « Séances générales, conférences spéciales et répertoire des Actes » comprend le programme complet de la Conférence, la liste numérique des mémoires et un index des noms de leurs auteurs, la liste des délégués, les comptes rendus des séances d'ouverture et de clôture, et le texte complet des conférences spéciales du soir.

M. Francis Perrin, Haut Commissaire français à l'énergie atomique, a bien voulu autoriser ses collaborateurs du Commissariat à participer à la traduction et à la revision scientifique des mémoires présentés en langue étrangère qui figurent dans le présent volume. La préparation définitive du texte a été faite sous la direction de M. Yves Aubineau, Chef du Service de documentation du CEA.

TABLE DES MATIÈRES

Séance 2 : Les besoins du monde en énergie

2.1 : Études générales sur l'estimation des besoins énergétiques mondiaux dans les cinquante années à venir : autres possibilités de production d'énergie

			Pages
P/902	Organisation des Nations Unies	Besoins du monde en énergie en 1975 et en l'an 2000	3
P/326	Ailleret	Estimation des besoins en énergie	36
P/757	Robinson et Daniel . . .	Le monde a besoin d'une nouvelle source d'énergie	40
P/802	Mason *et al.*	Besoins en énergie et développement économique	53
P/324	Ba Hli	Sources d'énergie non classiques	79
P/467	Daniels	Sources d'énergie de remplacement (non classiques)	86

2.2 : Besoins et ressources de différents pays dans les domaines énergétique et thermique

P/1116	Organisation des Nations Unies	L'énergie nucléaire dans le bilan énergétique mondial futur .	96
P/868	Bhabha	Le rôle de l'énergie atomique en Inde et ses possibilités dans l'immédiat	116
P/125	Motta Rezende	Le plan brésilien d'électrification et les possibilités offertes par l'énergie atomique	125
P/962	Blažek *et al.*	Les besoins et les possibilités de production d'énergie en Yougoslavie	136
P/987	Commonwealth Department of National Development, Australie . . .	L'énergie électrique en Australie de 1955 à 2004	140
P/949	Van Mele	Évolution probable des besoins d'énergie en Belgique et rôle que pourra jouer l'énergie nucléaire	154
P/799	Ševčík	Perspectives de développement de la production d'énergie dans la République tchécoslovaque et importance de l'énergie nucléaire utilisée à des fins pacifiques	165
P/1060	Aki	L'utilisation de l'énergie au Japon : le présent et l'avenir . .	172
P/998	Mendivelzúa	Besoins et ressources de la République Argentine en énergie électrique et thermique	178
P/1074	. . . . .	Besoins et ressources de l'Autriche en énergie électrique et thermique durant les cinquante années à venir	189
P/325	Ba Hli	Besoins et ressources de la Birmanie en énergie électrique et thermique	190
P/3	Davis	L'électricité dans les différentes régions du Canada. Quelques prévisions dans le domaine de l'énergie nucléaire	192
P/864	Sun	Le rôle de l'énergie électronucléaire dans le plan d'expansion de l'énergie en Chine au cours des cinquante années à venir	198

			Pages
P/1108	El-Koshairy et Abdel-Rahman	Besoins de la République d'Égypte en énergie électrique et thermique	204
P/1106	Nordqvist	Les besoins futurs et les ressources de la Finlande en énergie électrique et thermique	212
P/1102	Commission de l'énergie atomique de la Grèce	Besoins et ressources de la Grèce en énergie électrique et thermique au cours des cinquante années à venir	219
P/772	Commission de l'énergie atomique d'Israël	Les besoins en énergie de l'État d'Israël	221
P/919	Giordani	La demande italienne d'énergie en 1975 et en l'an 2000 et le rôle possible de l'énergie électronucléaire en Italie au cours du prochain demi-siècle	231
P/1115	Park	Les besoins futurs de la Corée en énergie électrique et thermique	242
P/1082	Département d'État pour l'énergie hydroélectrique, Nouvelle-Zélande	Note sur l'offre et la demande d'énergie électrique en Nouvelle-Zélande	246
P/877	Vogt	La consommation d'énergie en Norvège	247
P/1113		Les besoins en énergie du Pakistan au cours des vingt prochaines années et la nécessité pour ce pays d'avoir recours à l'énergie nucléaire	250
P/981	Rodriguez et Ramirez	Les ressources des Philippines en énergie électrique et en combustibles	254
P/1083	Manzannares	Sources et besoins d'énergie au Portugal	260
P/781	Brynielsson	La situation de l'énergie en Suède	266
P/1117		Besoins et ressources de la Suisse en énergie électrique et thermique	271
P/955	Binson	Besoins et ressources de la Thaïlande en énergie électrique et thermique	273
P/388	Daniel	Besoins du Royaume-Uni en énergie	278
P/469	Hughes et Nelson	Un siècle d'accroissement des besoins d'énergie électrique aux États-Unis d'Amérique	284
P/1085	Hill et Villar	Évaluation des besoins de l'Uruguay en énergie pendant les périodes 1955-1975 et 1975-2000	292
P/1086	Hill et Villar	Sources d'énergie utilisables pour répondre aux besoins en énergie de l'Uruguay pendant les périodes 1955-1975 et 1975-2000 et possibilités d'utilisation de l'énergie électronucléaire dans ce pays	294

NOTE. — Les quatre mémoires suivants sont arrivés trop tard pour être distribués pendant la Conférence de Genève. Ils sont inclus dans le volume à titre de documentation supplémentaire pour que le tableau des besoins du monde en énergie soit aussi complet que possible.

Tukan	Les besoins de la Jordanie en énergie électrique	298
	Les besoins de l'Iran en énergie électrique et thermique	300
Eliezer	Les ressources et les besoins de Ceylan en énergie	302
	Les besoins de la Syrie en énergie électrique	306

Compte rendu de la séance 309

Séance 3.2 : Investissements nécessaires dans le domaine de l'énergie nucléaire

Pages

P/391 Hill et Joslin . . . . . Les investissements nécessaires pour l'exploitation de l'énergie nucléaire 333

P/477 Davis . . . . . Les investissements nécessaires pour l'exploitation de l'énergie nucléaire 337

Compte rendu de la séance 354

Séances 4.1 et 4.2 :

4.1 : Étude économique de la production d'énergie électronucléaire

P/476 Lane . . . . . Aspects économiques de la production d'énergie électronucléaire 361

P/390 Jukes . . . . . Prix de revient de l'énergie et valeur marchande du plutonium provenant des premières centrales nucléaires 375

P/798 Bečvář et H. Ševčík . . Importance, pour l'économie de l'énergie électronucléaire, des facteurs inhérents aux phases thermique et électrique du processus de production 382

4.2 : Le rôle du thorium

P/867 Dunworth . . . . . Le rôle que peut jouer le thorium dans la production d'énergie nucléaire 392

Compte rendu des séances 396

Séance 5 : Le rôle de l'énergie nucléaire dans les cinquante prochaines années

P/893 Organisation des Nations Unies . . . . . Quelques considérations sur l'emploi de l'énergie nucléaire pour le développement économique des pays sous-développés 401

P/11 Davis et Lewis . . . . . Prévisions économiques du rôle de l'énergie électronucléaire au Canada 407

P/327 Ailleret et Taranger . . . Intégration de l'énergie nucléaire parmi les moyens de production de l'énergie en France 417

P/758 Kay . . . . . Rôle comparé de l'énergie nucléaire et des autres sources d'énergie 420

P/145 de Mattos et Ribeiro . . Importance de l'énergie nucléaire pour l'économie du Brésil . 426

P/1002 Iraolagoitía . . . . . Rôle de l'énergie électronucléaire dans la République Argentine 468

P/475 Mayer . . . . . Les possibilités économiques de l'énergie d'origine nucléaire 475

P/389 Cockcroft . . . . . Contribution de l'énergie d'origine nucléaire aux ressources énergétiques du Royaume-Uni et du monde jusqu'en 1975 . 484

P/1078 Schonland . . . . . L'énergie nucléaire et l'Afrique du Sud 487

P/468 Sporn . . . . . Le rôle de l'énergie et celui de l'énergie nucléaire aux États-Unis 490

P/810 Mayne et Mullenbach . . Les perspectives de l'énergie électronucléaire à Porto Rico . 504

P/849 Morris . . . . . Les États-Unis ont besoin de petites génératrices nucléaires 513

P/863 Cisler . . . . . Rôle que peut jouer l'énergie nucléaire en tant que source d'énergie au cours des 25 à 50 années à venir 518

P/1087 Hill et Villar . . . . . Rôle des centrales électronucléaires de puissance moyenne dans le développement futur de la civilisation, et leurs possibilités d'emploi en Uruguay 525

Compte rendu de la séance 529

Séance 24.2 : Instruction et formation du personnel en matière d'énergie nucléaire

			Pages
P/983	UNESCO	Formation du personnel de recherches dans le domaine de l'utilisation pacifique de l'énergie atomique	541
P/466	Goodlet et White	Enseignement professionnel et formation du personnel technique pour l'énergie nucléaire	547
P/755	Anderson *et al.*	L'enseignement théorique et pratique des sciences nucléaires pures et appliquées aux États-Unis d'Amérique	550
P/779	Organisation mondiale de la santé	L'enseignement et la formation professionnelle en matière d'utilisation de l'énergie atomique dans les domaines de la santé et de la médecine	560

Compte rendu de la séance 568

Séance 2

LES BESOINS DU MONDE EN ÉNERGIE

LISTE DES MÉMOIRES

2.1. — Études générales sur l'estimation des besoins énergétiques mondiaux dans les cinquante années à venir : autres possibilités de production d'énergie

			Pages
P/902	Besoins du monde en énergie en 1975 et en l'an 2000 . . .	Département des affaires économiques et sociales, ONU	3
P/326	Estimation des besoins en énergie	P. Ailleret	36
P/757	Le monde a besoin d'une nouvelle source d'énergie	E. A. G. Robinson et G. H. Daniel	40
P/802	Besoins en énergie et développement économique	E. S. Mason *et al.* . . .	53
P/324	Sources d'énergie non classiques	F. Ba Hli	79
P/467	Sources d'énergie de remplacement (non classiques)	F. Daniels	86

2.2. — Besoins et ressources des différents pays dans les domaines énergétique et thermique

P/1116	L'énergie nucléaire dans le bilan énergétique mondial futur.	Département des affaires économiques et sociales, ONU	96
P/868	Le rôle de l'énergie atomique en Inde et ses possibilités dans l'immédiat	H. J. Bhabha	116
P/125	Le plan brésilien d'électrification et les possibilités offertes par l'énergie atomique	E. Motta Rezende . . .	125
P/962	Les besoins et les possibilités de production d'énergie en Yougoslavie	A. Blažek *et al.*	136
P/987	L'énergie électrique en Australie de 1955 à 2004	Commonwealth Department of National Development, Australie.	140
P/949	Évolution probable des besoins d'énergie en Belgique et rôle que pourra jouer l'énergie nucléaire	R. Van Mele	154
P/799	Perspectives de développement de la production d'énergie dans la République tchécoslovaque et importance de l'énergie nucléaire utilisée à des fins pacifiques	A. Ševčík	165
P/1060	L'utilisation de l'énergie au Japon : le présent et l'avenir .	K. Aki	172
P/998	Besoins et ressources de la République Argentine en énergie électrique et thermique	G. Mendivelzúa	178
P/1074	Besoins et ressources de l'Autriche en énergie électrique et thermique durant les cinquante années à venir	. . . . .	189
P/325	Besoins et ressources de la Birmanie en énergie électrique et thermique	F. Ba Hli	190
P/3	L'électricité dans les différentes régions du Canada. Quelques prévisions dans le domaine de l'énergie nucléaire	J. Davis	192
P/864	Le rôle de l'énergie électronucléaire dans le plan d'expansion de l'énergie en Chine au cours des cinquante années à venir	Y. S. Sun	198

			Pages
P/1108	Besoins de la République d'Égypte en énergie électrique et thermique	M. A. B. El-Koshairy et I. H. Abdel-Rahman	204
P/1106	Les besoins futurs et les ressources de la Finlande en énergie électrique et thermique	B. Nordqvist	212
P/1102	Besoins et ressources de la Grèce en énergie électrique et thermique au cours des cinquante années à venir	Commission de l'énergie atomique de la Grèce	219
P/772	Les besoins en énergie de l'État d'Israël	Commission de l'énergie atomique d'Israël	221
P/919	La demande italienne d'énergie en 1975 et en l'an 2000 et le rôle possible de l'énergie électronucléaire en Italie au cours du prochain demi-siècle	F. Giordani	231
P/1115	Les besoins futurs de la Corée en énergie électrique et thermique	C. Park	242
P/1082	Note sur l'offre et la demande d'énergie électrique en Nouvelle-Zélande	Département d'État pour l'énergie hydroélectrique, Nouvelle-Zélande	246
P/877	La consommation d'énergie en Norvège	F. Vogt	247
P/1113	Les besoins en énergie du Pakistan au cours des vingt prochaines années et la nécessité pour ce pays d'avoir recours à l'énergie nucléaire	. . . . .	250
P/981	Les ressources des Philippines en énergie électrique et en combustibles	F. G. Rodriguez et C. S. Ramirez	254
P/1083	Sources et besoins d'énergie au Portugal	A. A. Manzannares	260
P/781	La situation de l'énergie en Suède	H. Brynielsson	266
P/1117	Besoins et ressources de la Suisse en énergie électrique et thermique	. . . . .	271
P/955	Besoins et ressources de la Thaïlande en énergie électrique et thermique	B. Binson	273
P/388	Besoins du Royaume-Uni en énergie	G. H. Daniel	278
P/469	Un siècle d'accroissement des besoins d'énergie électrique aux États-Unis d'Amérique	E. T. Hughes et N. C. Nelson	284
P/1085	Évaluation des besoins de l'Uruguay en énergie pendant les périodes 1955-1975 et 1975-2000	W. S. Hill et G. E. Villar	292
P/1086	Sources d'énergie utilisables pour répondre aux besoins en énergie de l'Uruguay pendant les périodes 1955-1975 et 1975-2000 et possibilités d'utilisation de l'énergie électronucléaire dans ce pays	W. S. Hill et G. E. Villar	294

NOTE. — Les quatre mémoires suivants sont arrivés trop tard pour être distribués pendant la Conférence de Genève. Ils sont inclus dans le volume à titre de documentation supplémentaire pour que le tableau des besoins du monde en énergie soit aussi complet que possible.

Les besoins de la Jordanie en énergie électrique	K. Tukan	298
Les besoins de l'Iran en énergie électrique et thermique	. . . . .	300
Les ressources et les besoins de Ceylan en énergie	C. J. Eliezer	302
Les besoins de la Syrie en énergie électrique	. . . . .	306

Besoins du monde en énergie en 1975 et en l'an 2000

Département des affaires économiques et sociales, Organisation des Nations Unies

Les futurs besoins mondiaux en énergie d'origine nucléaire dépendront surtout de la mesure dans laquelle les sources d'énergie nucléaire permettront mieux que les autres de répondre aux besoins de l'homme. Ils sont donc liés, d'une part, à l'importance de la quantité de chaleur et d'énergie qui sera nécessaire et, d'autre part, au degré de disponibilité et d'adaptabilité que présentera l'énergie tirée des matières fissiles par rapport à l'énergie produite à partir de toutes les autres sources. Le présent mémoire ne traite que du premier de ces deux aspects de la question de l'énergie nucléaire, c'est-à-dire de l'ordre de grandeur et du caractère des besoins futurs.

Ce mémoire déborde légèrement du cadre de la question inscrite à l'ordre du jour de la séance 2 de la Conférence sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques en ce qu'il traite des besoins en énergie sous *toutes* ses formes et non pas seulement des besoins en force motrice. S'il en est ainsi, c'est parce que la distinction entre l'énergie consommée sous forme de force motrice et les autres formes d'énergie n'a rien d'immuable : tel procédé qui utilise aujourd'hui la chaleur pourra, demain, faire appel à l'énergie électrique; les fourneaux de cuisine chauffés naguère au charbon ont fait place à des cuisinières électriques qui transforment l'électricité en chaleur, à partir de laquelle elle a souvent été produite.

Dans le présent mémoire, on a tout d'abord indiqué ce qu'est actuellement la consommation mondiale d'énergie, du point de vue des quantités utilisées, des sources d'où elles sont tirées et des usages auxquels on les consacre. On a ensuite examiné le taux de variation de l'utilisation de l'énergie dans le passé et des conditions qui agissent sur cette utilisation. Enfin, on a essayé de déterminer ce que pourrait être l'ordre de grandeur des besoins énergétiques en 1975 et en 2000, en tenant compte, dans une certaine mesure, du type et de la forme de l'énergie, ainsi que des sources permettant de la produire.

On n'a pas perdu de vue dans ce mémoire la grande différence qui existe entre la consommation *totale* d'énergie et la quantité d'énergie *utilement* consommée. La relation qui s'établit entre ces deux quantités est variable et se trouvera peut-être radicalement modifiée si le rendement d'utilisation des combustibles nucléaires diffère considérablement de celui des autres combustibles. Pour cette raison, on ne peut prévoir directement les besoins *totaux* en combustible et en force motrice pour les années 1975 et 2000; on ne peut estimer ces besoins qu'en faisant des déductions tenant compte à la fois des besoins potentiels en énergie utile et de certaines hypothèses relatives aux préférences pour certains combustibles et certaines formes d'énergie et aux variations du rendement d'utilisation des combustibles. C'est la méthode que l'on a utilisée dans le présent mémoire.

Les conclusions auxquelles on est parvenu sont naturellement sujettes aux réserves qui vont normalement de pair avec des prévisions à aussi long terme. A ces réserves, il faut en ajouter d'autres qui concernent les données statistiques utilisées pour aboutir à ces conclusions. Les données en question proviennent essentiellement de publications officielles, mais, pour donner un tableau complet de la situation mondiale, on a dû procéder à de nombreuses évaluations en ce qui concerne d'une part l'Europe orientale, l'U.R.S.S. et la Chine continentale, et d'autre part l'utilisation de l'énergie. On trouvera en annexe à cette étude une description des méthodes employées et des résultats obtenus.

Chapitre I

L'ÉNERGIE DANS LE MONDE EN 1952

La production mondiale d'énergie correspondait en 1952 à 29 milliards de mégawattheures, soit à peu près 12 MWh par habitant, à condition de compter les combustibles à leur valeur calorifique intégrale. La majeure partie de cette énergie a été obtenue à partir de combustibles minéraux, le reste à partir de la houille blanche, de combustibles végétaux et de sources d'énergie animale (tableau 1).

En fait, on n'a tiré parti que d'une fraction de cette énergie : une partie a été en effet détournée de l'utilisation thermique par la fabrication de produits non combustibles tels que les lubrifiants, les goudrons et le noir de fumée; une autre a été mise en réserve; enfin des quantités relativement importantes sont perdues au cours de la production

Original : anglais.

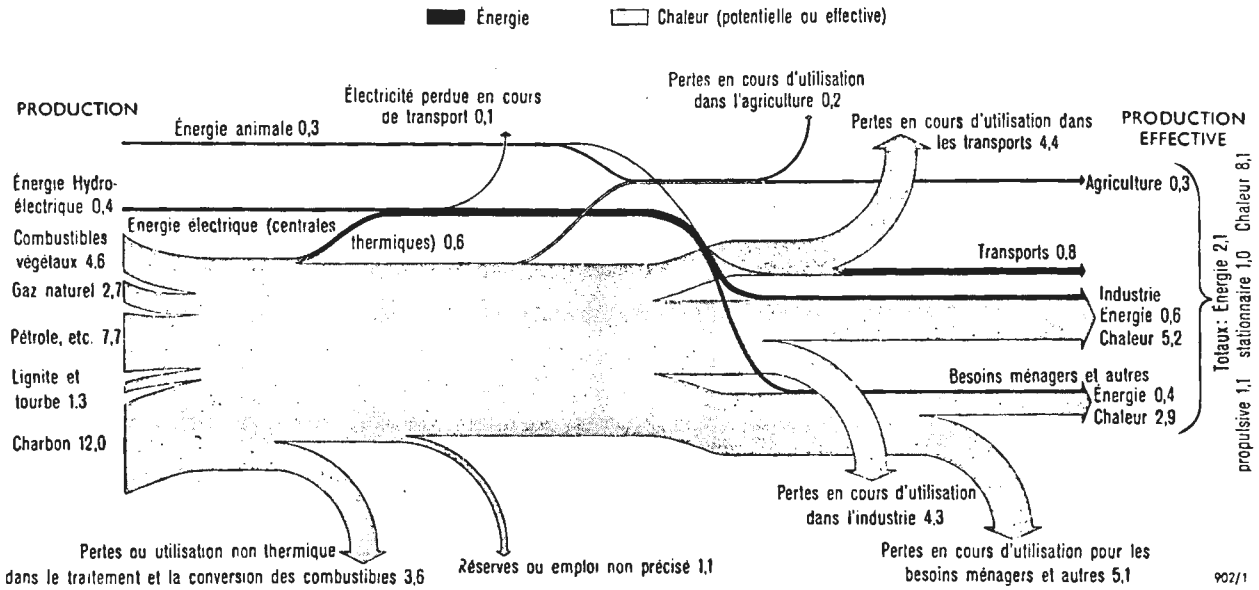


Figure 1. — Origine et utilisation de l'énergie mondiale en 1952 (en milliards de mégawattheures).

N. B. — Les quantités suivantes de combustible équivalent à 1 mégawattheure d'énergie (soit 1 000 kWh, soit 1 000 000 Wh, soit 3 412 000 Btu, soit 860 000 kcal ou millithermies) : 125 kg de charbon, 400 kg de lignite, 250 kg de tourbe, 83,3 kg de pétrole ou d'essence ordinaire, 94,5 m³ de gaz naturel, 750 kg ou 0,5 m³ de combustibles végétaux et 0,04 g d'uranium-235.

Tableau 1

Production mondiale de combustibles et d'énergie en 1952

	Quantité (10^9 MWh)	Pourcentage
Charbon	12,0	41,4
Lignite et tourbe	1,3	4,5
Pétrole ou essence ordinaire	7,7	26,5
Gaz naturel	2,7	9,3
Ensemble des combustibles minéraux	23,7	81,7
Énergie hydroélectrique	0,4	1,4
Combustibles végétaux	4,6	15,9
Énergie animale	0,3	1,0
TOTAL	29,0	100,0

d'énergie électrique. Les pertes les plus importantes se produisent au moment de la consommation; presque la moitié du volume initial d'énergie disparaît, en cours d'utilisation, sous forme de déperdition de chaleur. La quantité d'énergie perdue ou détournée de son utilisation thermique s'est élevée au total à 65 pour cent de l'énergie produite en 1952; 35 pour cent seulement de l'énergie disponible ont donc fourni un travail utile.

Le graphique qui constitue la figure 1 et le tableau 2 donnent un aperçu des sources et de l'utilisation de l'énergie consommée dans le monde en 1952.

Tableau 2

Répartition de la consommation d'énergie dans le monde en 1952

	(10^9 MWh)
Production	*29,0*
Pertes et détournements à des fins non thermiques	*18,8*
Dans les usines de transformation	3,6
(Raffineries de pétrole)	(0,8)
(Cokeries et usines à gaz)	(0,5)
(Centrales électriques)	(2,3)
En cours de transport	0,1
En cours d'utilisation	14,0
Divers[a]	1,1
Utilisation effective (chaleur et énergie)	*10,2*
Agriculture	0,3
Transports	0,8
Industrie	5,8
Besoins ménagers	3,3

[a] Y compris l'accroissement net des stocks, le gaz naturel utilisé pour la production de noir de fumée, les gaz de pétrole liquéfiés utilisés dans les industries chimiques, les quantités utilisées à des fins militaires et les quantités dont l'emploi n'est pas précisé.

La répartition de la consommation de chaleur et d'énergie *utiles* entre les différents secteurs de l'économie en 1952 est indiquée au tableau 3.

Tableau 3

Consommation mondiale de chaleur et d'énergie en 1952

(10^9 MWh)

	Chaleur utile	Énergie utile	Total
Agriculture	—	0,3	0,3
Transports	—	0,8	0,8
Industrie	5,2	0,6	5,8
Besoins ménagers, etc.	2,9	0,4	3,3
TOTAL	8,1	2,1	10,2

La plus grande partie de l'énergie disponible en 1952 a été consommée dans les régions industrialisées du monde, comme le montre le tableau 4.

contre seulement 1 MWh environ par habitant dans les régions sous-développées (tableau 5).

Tableau 5

Répartition de la consommation d'énergie utile en 1952

	Total (10^9 MWh)	Par habitant (MWh)
Régions industrialisées	8,4	10,5
Régions sous-développées	1,8	1,1
Monde	10,2	4,1

Étant donné que les formes d'énergie utilisées et les sources d'où elles seront tirées exerceront une influence directe sur l'approvisionnement et les besoins futurs en énergie, il convient de décrire

Tableau 4

Répartition de la consommation totale d'énergie en 1952

	Quantité [a] (10^9 MWh)		Pourcentage	
Amérique du Nord	10,4		35,9	
Europe occidentale	5,5		19,0	
Europe orientale — U.R.S.S.	5,0		17,2	
Autres zones industrialisées [b]	0,6		2,1	
Total pour les zones industrialisées		21,5		74,2
Asie	3,9		13,4	
Amérique latine	1,1		3,8	
Afrique (non compris l'Union Sud-Africaine)	0,5		1,7	
Total pour les régions sous-développées		5,5		18,9
Transports maritimes	0,7		2,4	
Non comptabilisé [c]	1,3		4,5	
MONDE		29,0		100,0

[a] Les chiffres globaux concernant ces régions ne comprennent pas les combustibles de soute.

[b] Océanie et Union Sud-Africaine.

[c] Énergie animale, pétrole utilisé à des fins non thermiques et accroissement net des stocks.

Le taux de consommation énergétique par habitant, comme le montre la figure 2, varie considérablement d'un pays à l'autre. Dans les pays sous-développés, la moyenne est inférieure à 6 MWh, tandis que dans les pays industrialisés elle est comprise entre 11 MWh (en Suisse) et 62 MWh (aux États-Unis d'Amérique).

Le contraste entre les régions sous-développées et les régions industrialisées est encore plus marqué si l'on ne tient compte que de l'énergie *utile* consommée. On estime que les régions industrialisées ont consommé 82 pour cent de l'énergie utile totale, soit en moyenne plus de 10 MWh par habitant

brièvement la manière dont les besoins en énergie ont été satisfaits, dans chaque secteur de l'économie, en 1952.

Énergie utilisée dans l'industrie

Dix pour cent de l'énergie utilisée dans l'industrie l'ont été sous forme directe de force motrice et 90 pour cent sous forme de chaleur. La force motrice a été en majeure partie obtenue à partir de l'énergie électrique fournie par des compagnies, mais l'industrie a produit en 1952, pour son propre usage, 134 millions de mégawattheures d'énergie thermo-électrique et 25 millions environ d'énergie hydro-

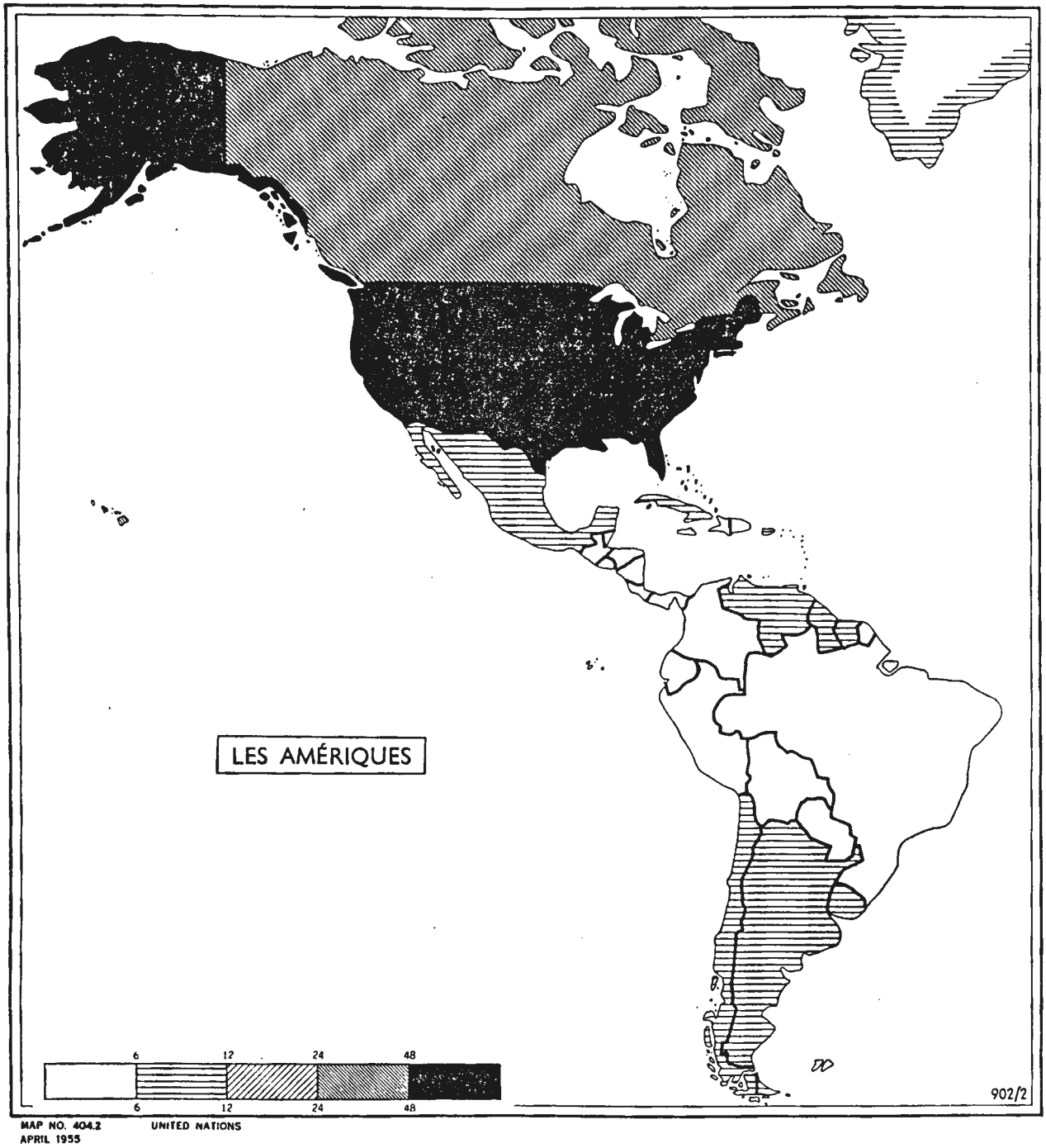
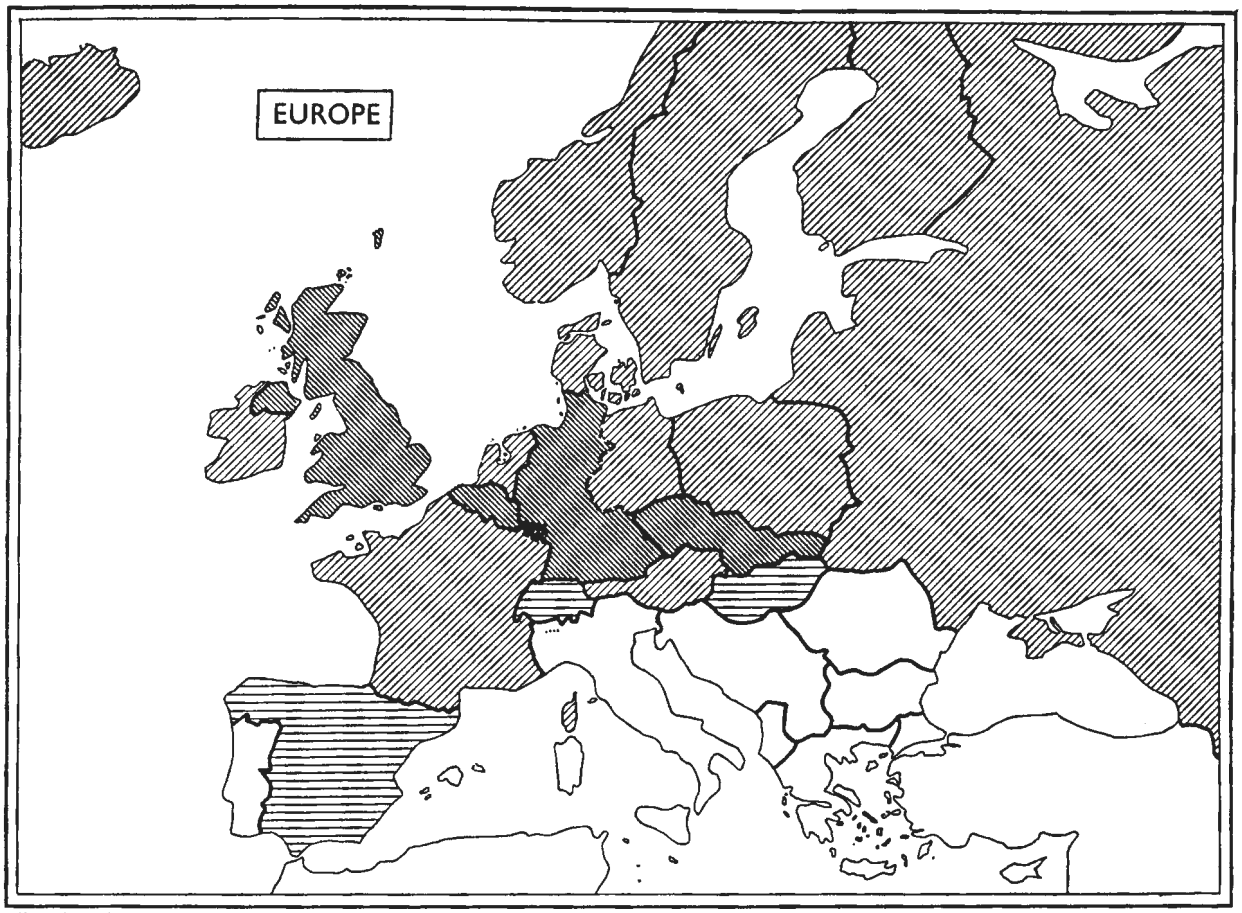


Figure 2. — Volume brut de la consommation intérieure d'énergie en 1952 (mégawattheures par habitant).

N. B. — Le tracé des frontières figurant sur les présentes cartes n'implique ni une approbation ni une acceptation officielles de la part des Nations Unies.

électrique. L'industrie utilise également dans une certaine mesure de l'énergie hydromécanique et thermomécanique, mais il est impossible d'en préciser les quantités. Dans l'industrie, le travail humain est plutôt un facteur de contrôle qu'un facteur d'énergie; le travail effectué par l'ensemble


EUROPE
MAP NO. 405.2
APRIL 1955
UNITED NATIONS

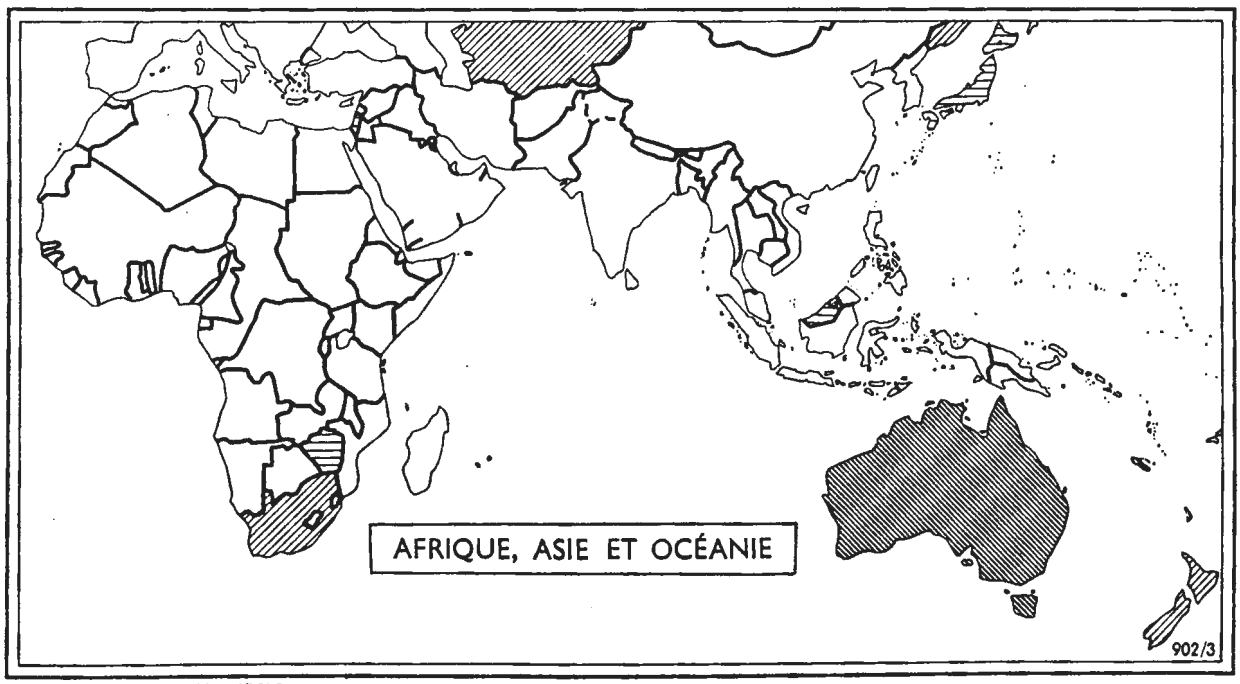

AFRIQUE, ASIE ET OCÉANIE
902/3
MAP NO. 406.2
APRIL 1955
UNITED NATIONS

Figure 2 *bis*.

Tableau 6

Origine de la chaleur utilisée dans l'industrie en 1952

(Quantités de chaleur transformées, 10^6 MWh)

	Énergie fournie	Chaleur utile obtenue	
		Quantité	Pourcentage
Charbon, lignite et agglomérés	2 490	1 370	24,6
Coke (et gaz provenant des hauts fourneaux)	1 085	597	10,7
Produits de la distillation du pétrole	236	128	2,3
Mazout	833	500	9,0
Gaz naturel et gaz de pétrole liquéfiés	1 273	1 018	18,2
Autres gaz	446	357	6,4
Combustibles végétaux	516	206	3,7
Non précisé[a]	2 720	1 398	25,1
Total brut	9 599	5 574	100,0
A déduire : quantité de chaleur utilisée pour produire de l'électricité dans l'industrie	—	400	—
Total net	9 599	5 174	—

[a] Les chiffres concernant la consommation en Europe orientale, dans l'U.R.S.S. et en Chine continentale résultent d'évaluations.

de la main-d'œuvre dans les mines et les usines a probablement été équivalent à moins de 15 millions de mégawattheures en 1952.

La chaleur utilisée dans l'industrie, notamment la production de force motrice, a été fournie par une grande variété de combustibles, utilisés avec des rendements très variables (tableau 6).

Énergie utilisée dans les transports

L'énergie utilisée dans le secteur des transports a servi presque uniquement à fournir de la force motrice, qui s'est répartie entre les différents moyens de locomotion, comme l'indique le tableau 7.

Tableau 7

Répartition de la consommation d'énergie (force motrice) dans les transports en 1952

	Quantité (10^6 MWh)	Pourcentage
Véhicules automobiles	376	49,9
Chemins de fer	106	14,0
Navires	176	23,3
Pipe-lines (États-Unis d'Amérique seulement)	17	2,3
Aviation (secteur civil seulement)	14	1,9
Non précisé[a]	65	8,6
TOTAL	754	100,0

[a] Les chiffres relatifs à la consommation d'énergie en Europe orientale, dans l'U.R.S.S. et en Chine continentale résultent d'évaluations.

Une faible partie de cette énergie (25 à 30 × 10^6 MWh) a été consommée sous forme d'énergie électrique achetée à des compagnies et employée pour le fonctionnement des chemins de fer électrifiés, des tramways et des pipe-lines. Le reste a été dans une large mesure consommé sous forme d'énergie mécanique produite par les véhicules eux-mêmes à partir de combustibles solides, liquides ou gazeux, comme le montre le tableau 8.

Tableau 8

Origine de l'énergie utilisée dans les transports en 1952

(10^6 MWh)

	Énergie fournie	Énergie obtenue	
		Quantité	Pourcentage
Charbon, lignite, tourbe, agglomérés et coke	1 126	60	8,0
Produits de la distillation du pétrole	2 248	468	62,1
Mazout	725	119	15,8
Gaz (y compris les gaz de pétrole liquéfiés)	74	18	2,4
Bois de chauffage	42	1	0,1
Électricité	23	23	3,0
Non précisé[a]	940	65	8,6
TOTAL	5 178	754	100,0

[a] Les chiffres concernant la consommation en Europe orientale, dans l'U.R.S.S. et en Chine continentale résultent d'évaluations.

Tableau 9

Origine de la chaleur [a] utilisée pour les besoins ménagers en 1952

(10^6 MWh)

	Énergie fournie	Énergie calorifique utile obtenue	
		Quantité	Pourcentage
Charbon, lignite, tourbe, agglomérés	1 687	672	23,2
Coke	214	86	3,0
Produits de la distillation du pétrole	832	470	16,2
Mazout	173	104	3,6
Gaz (y compris les gaz de pétrole liquéfiés)	848	509	17,5
Combustibles végétaux	2 488	498	17,2
Non précisé [b]	1 776	560	19,3
TOTAL	8 018	2 899	100,0

[a] Non compris l'énergie thermique produite par les stations de chauffage urbain et les centrales thermiques, qui revêt une grande importance dans certaines des plus grandes villes de la zone tempérée (New York, Paris, Moscou, etc.); non compris également la chaleur produite à partir de l'énergie électrique.

[b] Les chiffres relatifs à la consommation en Europe orientale, dans l'U.R.S.S. et en Chine continentale résultent d'évaluations.

Pour obtenir les 754 millions de mégawattheures nécessaires aux transports, il a ainsi fallu consommer des combustibles représentant une valeur énergétique totale de 5 178 millions de mégawattheures. Le niveau peu élevé du rendement d'utilisation des sources d'énergie — 15 pour cent — peut dans une large mesure être attribué au faible rendement des locomotives à vapeur.

Énergie utilisée pour les besoins ménagers

La chaleur utilisée pour les besoins ménagers en 1952, qui a représenté une énergie de 2 900 millions de mégawattheures, a servi au chauffage des habitations, à la cuisson des aliments et au chauffage de l'eau. Les statistiques disponibles ne permettent pas de faire la distinction entre ces différentes utilisations. Comme dans le cas de l'industrie, cette énergie calorifique a été obtenue à partir d'une grande variété de combustibles, utilisés avec des rendements variables, comme l'indique le tableau 9.

L'énergie utilisée pour les besoins ménagers en 1952 a été consommée en majeure partie sous forme d'énergie électrique achetée à des compagnies. Toutefois, une partie importante du travail ménager a encore été effectuée sous forme manuelle, surtout dans les pays sous-développés.

Énergie utilisée dans l'agriculture

L'énergie utilisée dans l'agriculture en 1952 a presque entièrement été consommée sous forme de force motrice. La traction animale et le travail humain ont représenté 80 pour cent de cette force motrice. Les huiles minérales, consommées par les tracteurs, ont fourni la majeure partie du reste, comme l'indique le tableau 10.

Tableau 10

Évaluation de l'énergie consommée dans l'agriculture en 1952 [a]

	(10^6 MWh)
Traction animale	86
Travail humain	70
Tracteurs	46
Non précisé [b]	70
TOTAL	272

[a] Non compris des quantités relativement faibles d'électricité et des quantités assez importantes d'énergie consommées par les camions (dont on a tenu compte dans la section consacrée aux transports).

[b] Les chiffres relatifs à la consommation en Europe orientale, dans l'U.R.S.S. et en Chine continentale résultent d'évaluations.

Besoins énergétiques totaux

Certaines des utilisations de l'énergie présentent évidemment plus d'importance que d'autres, du point de vue de l'emploi de l'énergie atomique. On trouvera dans le tableau 11 un aperçu des utilisations de l'énergie dans lequel on a fait la distinction entre énergie stationnaire et énergie propulsive; s'agissant de cette dernière, on a classé les utilisations d'après la dimension des installations de consommation.

Quatre-vingt-douze pour cent de l'énergie *stationnaire* indiquée au tableau 11 a été consommée sous forme d'électricité, le reste sous forme d'énergie mécanique et animale. Au contraire, 79 pour cent de l'énergie *propulsive* a été utilisée sous forme d'énergie mécanique et 3 pour cent seulement sous forme d'énergie électrique, le reste, soit 18 pour cent,

Tableau 11

Répartition de la consommation d'énergie en 1952

	(10^6 MWh)
Énergie stationnaire (principalement électrique)	895
Énergie propulsive :	
Petites installations de consommation (transports routiers et agriculture)	578
Moyennes installations de consommation (transports ferroviaires et aériens)	120
Grandes installations de consommation (transports maritimes)	176
Non précisé [a]	295
TOTAL	2 074

[a] Les chiffres relatifs à la consommation en Europe orientale, dans l'U.R.S.S. et en Chine continentale résultent d'évaluations.

étant fourni par de la main-d'œuvre et des animaux de trait. Le tableau 12 donne les sources de ces différentes formes d'énergie :

Tableau 12

Sources de l'énergie consommée en 1952

(10^6 MWh)

	Énergie électrique	Énergie mécanique	Énergie animale	Total
Houille blanche	376	...	—	376
Combustibles	595	712	—	1 307
Main-d'œuvre et animaux de trait	—	—	205	205
Non précisé [a]	180	75	70	325
TOTAL	1 151 [b]	787	275	2 213 [b]

[a] Les chiffres concernant l'Europe orientale, l'U.R.S.S. et la Chine continentale résultent d'évaluations.

[b] Y compris 139 × 10^6 MWh perdus en cours de transport.

Besoins calorifiques totaux

Les besoins calorifiques mondiaux, en tant que tels, ont représenté une énergie de 8 072 millions de mégawattheures en 1952. Cette chaleur a été obtenue à partir des sources indiquées au tableau 13.

L'utilisation d'une grande variété de sources d'énergie, a donc permis de faire face, en 1952, aux besoins calorifiques et énergétiques, directement ou par l'intermédiaire de l'énergie thermoélectrique. Dans le cas de certaines industries métallurgiques, c'est une source particulière d'énergie, le coke, qui a permis de répondre aux besoins. De même, certains moyens de transport n'ont utilisé que des produits de la distillation du pétrole. Dans tous les

Tableau 13

Sources de la chaleur consommée en 1952

(10^6 MWh)

	Chaleur fournie	Chaleur utilement consommée
Combustibles minéraux solides	5 476	2 724
Produits de la distillation du pétrole	1 068	598
Mazout	1 006	603
Gaz	2 567	1 884
Combustibles végétaux	3 004	705
Non précisé [a]	4 496	1 958
Total brut	17 617	8 472
Consommation pour la production d'énergie électrique à des fins industrielles		400
Total net		8 072

[a] Les chiffres concernant la chaleur fournie et consommée en Europe orientale, dans l'U.R.S.S. et en Chine continentale résultent d'évaluations.

autres cas, cependant, le lien entre les besoins et les sources d'énergie a été assez lâche; il a dépendu avant tout des avantages économiques que présentait telle ou telle source d'énergie plutôt que du besoin à satisfaire.

Chapitre II

TAUX D'ACCROISSEMENT DES BESOINS MONDIAUX EN ÉNERGIE

Le graphique qui constitue la figure 3 indique l'accroissement de la production mondiale de sources *commerciales* d'énergie * pendant la période 1860-1953.

Pendant les quatre-vingt-treize années sur lesquelles porte le graphique, la production mondiale des sources commerciales d'énergie est passée de 1,1 à 23,4 milliards de mégawattheures, c'est-à-dire qu'elle a augmenté à un taux cumulatif annuel de 3,25 pour cent. On constatera que la courbe n'est pas régulière. Entre 1860 et 1913, la production a augmenté d'une manière presque ininterrompue, mais au cours de la période postérieure elle a accusé de brusques fluctuations. De 1913 à 1919, de 1929 à 1932 et de 1939 à 1945, la production d'énergie est restée stable ou a diminué, tandis que de 1919 à 1929, de 1932 à 1939 et de 1945 à 1953, on a enregistré une reprise rapide, cette production parvenant, dans chaque cas, à un maximum supérieur à celui qui avait été atteint précédemment (voir fig. 4).

* Charbon, lignite, combustibles extraits de pétrole, gaz naturel, essence ordinaire et houille blanche seulement. Sont exclus les combustibles végétaux, la tourbe, les sources d'énergie animale et les dérivés non combustibles du pétrole.

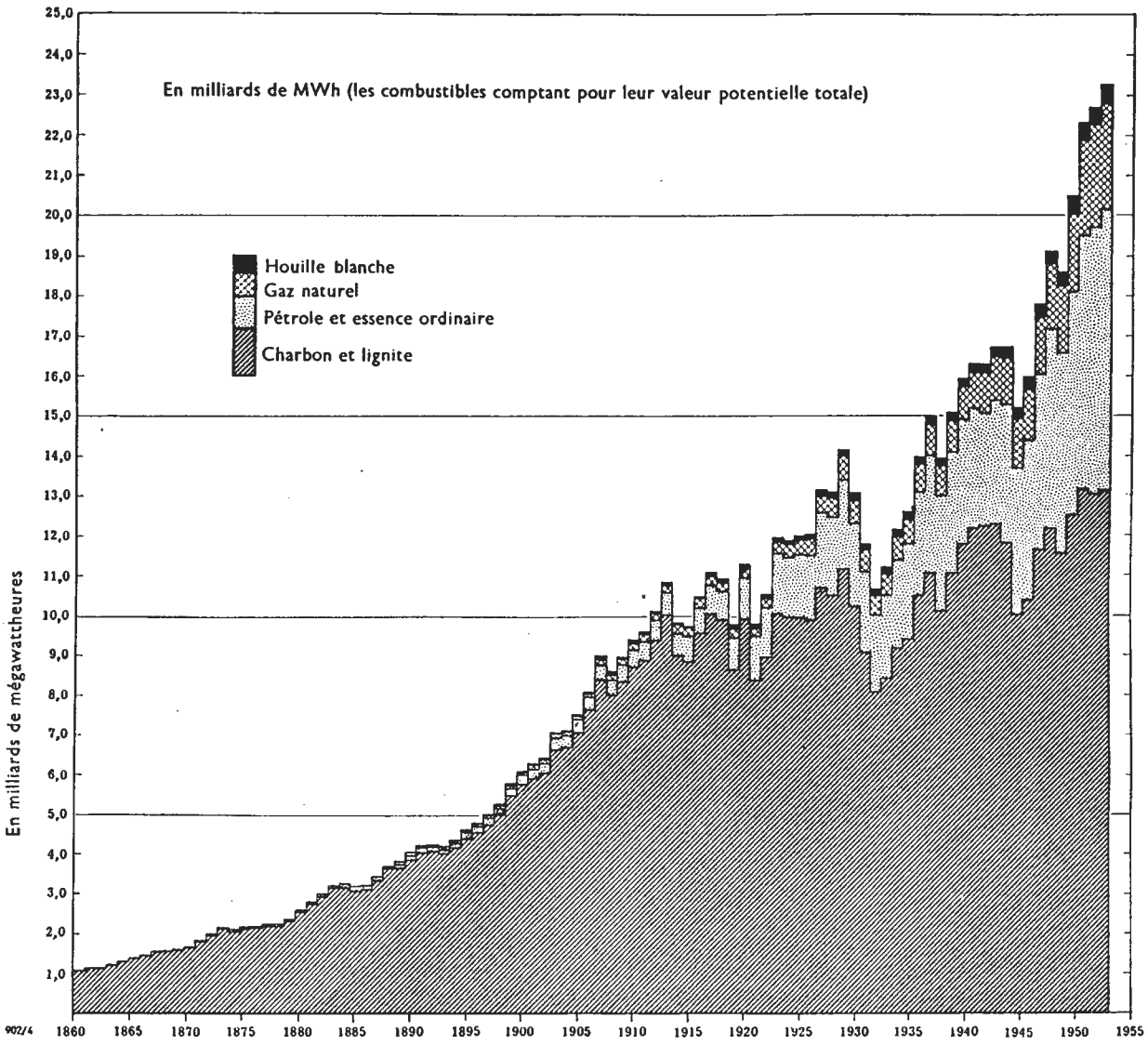


Figure 3. — Production mondiale des sources commerciales d'énergie, 1860-1953.

On peut constater que les périodes de stagnation ou de fléchissement de la production d'énergie coïncident avec la première guerre mondiale, la grande crise économique et la deuxième guerre mondiale. Pendant les périodes 1860-1913, 1919-1929, 1932-1939 et 1945-1953, les guerres et dépressions ont revêtu un caractère régional et n'ont guère eu d'effet que dans un seul pays ou une seule région. Au cours de ces périodes, la production des sources commerciales d'énergie s'est accrue à des taux annuels de 4,5 pour cent, de 4 pour cent, de 5 pour cent et de 5,5 pour cent, respectivement.

On peut également constater que l'importance relative de chaque combustible a considérablement varié pendant la période 1860-1953. Jusqu'à la première guerre mondiale, le charbon et le lignite ont représenté plus de 90 pour cent de toute la production. Par la suite, la place que ces combustibles ont tenue dans la production totale d'énergie a régulièrement diminué, de sorte qu'en 1953 ils ne fournissaient plus que 57 pour cent de l'énergie totale.

Si la courbe de la production des sources commerciales d'énergie fournit des premiers éléments pour l'évaluation des futurs besoins énergétiques, elle ne constitue cependant pas un point de départ pleinement satisfaisant. Il y a tout lieu de croire qu'elle *exagère* l'accroissement des besoins énergétiques au cours de la première partie de la période, pendant laquelle les sources commerciales d'énergie ont beaucoup servi à remplacer des combustibles comme le bois de chauffage. C'est ce que montrent les études de Dewhurst sur l'approvisionnement total des États-Unis d'Amérique en énergie [1] * d'où il ressort que la consommation de bois de

* Les numéros entre crochets renvoient aux références qui figurent au début de la bibliographie à la fin du présent mémoire.

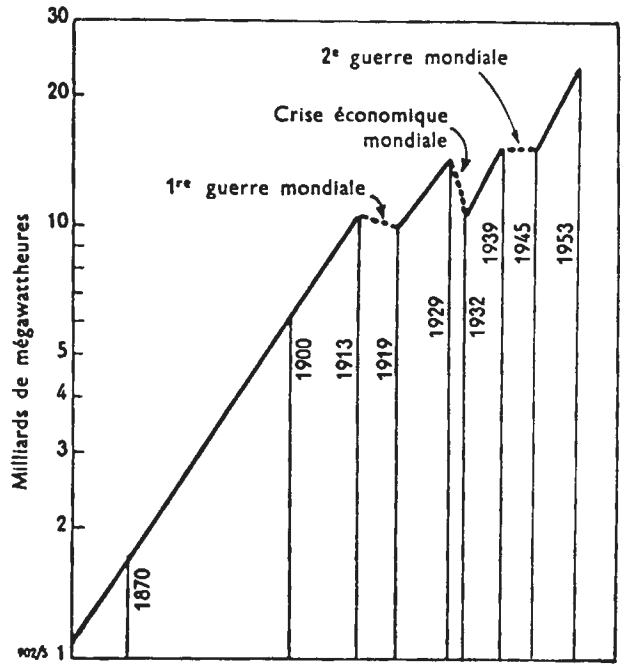


Figure 4. — Accroissement de la production mondiale de sources commerciales d'énergie au cours de certaines périodes, entre 1860 et 1953.

chauffage a augmenté jusqu'en 1870 et a régulièrement diminué par la suite. Les données fournies par Dewhurst pour la période 1860-1950, qui ont permis de tracer le graphique qui constitue la figure 5, prouvent que, si la production des sources commerciales d'énergie a augmenté plus rapidement que la production de l'ensemble des sources d'énergie jusqu'aux premières années du XX^e^ siècle, ces productions ont, par la suite, augmenté à peu près au même rythme.

Dans la mesure où l'on peut considérer que l'évolution qui s'est produite aux États-Unis d'Amérique a eu son équivalent dans tous les autres pays industrialisés, on peut conclure que, si la courbe de la production des sources commerciales d'énergie ne représente pas exactement l'accroissement de la production énergétique entre 1860 et 1900, elle n'en représente pas moins avec une exactitude suffisante l'accroissement de cette production entre 1900 et 1953.

Il y a lieu, par ailleurs, de penser que les deux courbes représentatives de la production qui sont données dans la figure 5 *sous-estiment* l'accroissement des besoins d'énergie *utile* au cours de la dernière partie de la période, du fait que, pendant les années en question, le rendement d'utilisation des sources d'énergie a considérablement augmenté. On possède relativement peu de renseignements sur l'évolution de ce rendement, mais ceux dont on dispose, joints à ce que l'on sait des progrès réalisés dans la technique industrielle, montrent que les besoins en combustibles et en énergie ont sensiblement diminué du fait de l'augmentation du rendement d'utilisation des combustibles, surtout depuis la fin de la première guerre mondiale. Dans le cas des centrales thermoélectriques, par exemple, le rendement moyen d'utilisation est passé de moins de 9 pour cent en 1920 à 24 pour cent en 1952. On a également réalisé des progrès importants en ce qui concerne le rendement d'utilisation des combustibles dans les locomotives de chemins de fer. Au cours de la période 1929-1952, bien que le trafic marchandises soit passé de 657 à 902 milliards de tonnes-kilomètres et le trafic voyageurs de 50 à 55 milliards de voyageurs-kilomètres, la consommation totale de combustibles dans les transports ferroviaires de la catégorie supérieure a diminué, passant de plus d'un milliard de mégawattheures à moins de 500 millions. En raison de l'évolution du rendement d'utilisation des combustibles dans ces deux domaines, les États-Unis d'Amérique ont pu tirer, en 1952, des combustibles utilisés dans les centrales électriques et les locomotives, trois fois plus d'énergie que ne le leur permettait la même quantité de combustibles en 1929.

Comme on sait qu'aux États-Unis, le rendement d'utilisation a subi certaines autres améliorations, il est évident que, dans ce pays tout au moins, la

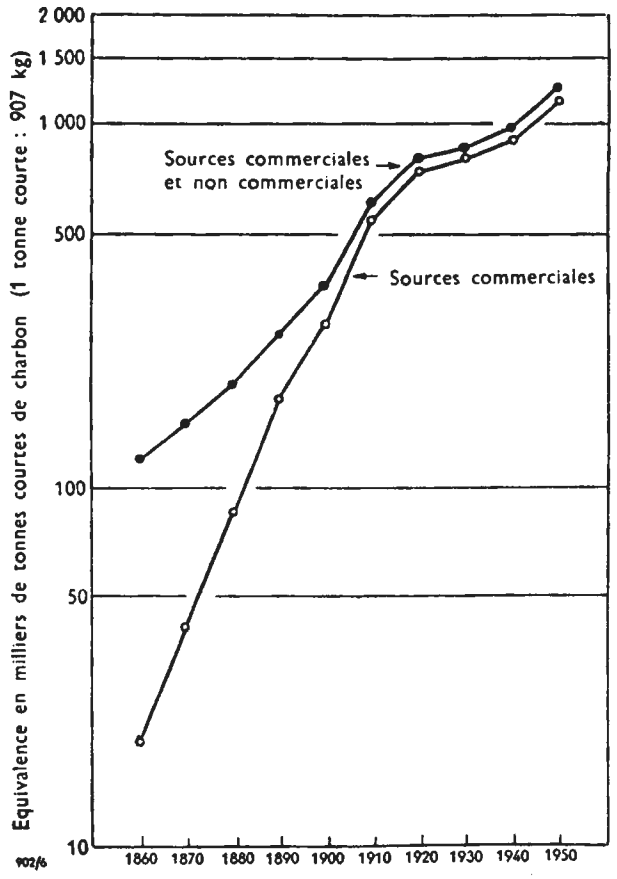


Figure 5. — Production des sources commerciales et non commerciales d'énergie aux États-Unis d'Amérique, de 1860 à 1950.

consommation *effective* d'énergie a augmenté plus rapidement encore que la consommation des sources commerciales d'énergie, au cours des années qui ont suivi la première guerre mondiale. Des améliorations analogues — bien que peut-être moins importantes * — du rendement d'utilisation des combustibles se sont aussi produites dans d'autres pays. On peut donc conclure que la courbe représentative de la production des sources commerciales d'énergie *sous-estime* l'augmentation des besoins en énergie utile au cours de la deuxième partie de la période 1860-1953 et que le taux réel d'accroissement de ces besoins n'a certainement pas été inférieur à 4 pour cent par an et a même peut-être dépassé 6 pour cent au cours des années de paix et de prospérité économique. Il semble donc raisonnable de supposer qu'en l'absence d'autre guerre et de toute dépression les taux d'accroissement des besoins mondiaux en énergie utile ne seront guère différents de ces chiffres.

Pour parvenir à une évaluation plus précise du taux d'augmentation probable des besoins futurs en énergie utile, il faut considérer les taux réel et probable d'accroissement de la consommation d'énergie dans chacun des principaux secteurs de l'économie. C'est ce que l'on a fait dans l'analyse ci-après. On est parti de l'idée qu'à moins de modifications importantes dans la structure interne de certains secteurs, les besoins en énergie de chaque secteur progresseront ou fléchiront probablement au même rythme que le niveau de l'activité économique. Cette hypothèse se fonde sur la relation physique entre le travail obtenu et l'énergie utilement consommée, ainsi que sur la relation statistique entre la consommation d'énergie et le produit national brut **.

Industrie

Dans l'industrie, on peut se faire une idée de l'accroissement de la consommation d'énergie par les variations de la production industrielle, dont on a calculé l'indice brut, donné dans le tableau 14 ***.

Tableau 14

Indice de la production industrielle mondiale, 1870-1952 (1870 = 100)

1870	100	1932	540
1900	310	1937	950
1913	530	1946	1 000
1920	500	1952	1 710
1929	800		

* La traction diesel a été introduite, en effet, plus rapidement dans les transports ferroviaires américains que dans ceux des autres pays.

** Cette relation a été dégagée dans un assez grand nombre d'études parmi lesquelles on peut citer celles de Tryon, Read, Hartley, Dewhurst, Olson, Barnett, Guyol, Prévôt, Zagaroff et autres (voir bibliographie).

*** Pour la méthode de calcul, voir annexe.

Le taux annuel moyen d'accroissement pour les périodes de paix et de prospérité, calculé à partir des données précédentes, s'établit approximativement comme suit :

	Pour cent
1870-1900	4
1900-1913	4
1920-1929	5,5
1932-1937	12
1946-1952	9,5

Bien que le rythme du développement de la production industrielle se soit considérablement accéléré au cours de la période envisagée, l'accroissement du taux de consommation d'énergie constaté de 1932 à 1937 et de 1946 à 1952 a été certainement dû en partie à la reprise économique et à la reconstruction plutôt qu'à la seule apparition de facteurs nouveaux. Il a été dû, en partie aussi sans doute, à l'essor relativement rapide qui s'est produit au cours des toutes dernières années dans certaines industries grosses consommatrices d'énergie, en particulier les industries chimiques et les industries métallurgiques légères. Compte tenu de ces circonstances, on peut raisonnablement conclure qu'à moins d'un grave conflit ou d'une dépression importante, le taux annuel de développement de l'industrie mondiale s'établira autour de 5 pour cent ****. Bien que ce taux de développement soit quelque peu supérieur au taux prévu dans certains pays industrialisés, il pourrait fort bien être celui de quelques pays industrialisés et de certaines régions du monde qui sont actuellement relativement peu développées. Étant donné que les deux tiers de la population mondiale vivent dans des régions dont le développement industriel est faible ou même nul, il serait en fait difficile de justifier un taux de développement inférieur à 5 pour cent par an.

Transports

On ne dispose pas d'indice satisfaisant de ce qu'a été le développement des transports mondiaux. Le taux de développement de ce secteur de l'économie doit donc être mesuré, pour la présente étude, à partir des taux relatifs du développement de l'industrie et des transports.

Dans les études qu'il a consacrées aux transports aux États-Unis d'Amérique, Barger [2] a montré que le « produit » de ce secteur a augmenté plus rapidement que celui de tout autre. Au cours de la période 1889-1890 — 1920, seule période pour laquelle les données fournies par cet auteur soient relativement complètes *****, l'indice de Barger montre que l'activité du secteur des transports est passée de 100 à 560, tandis que les indices correspondants des

**** Entre 1920 et 1952, l'industrie mondiale s'est développée à un taux moyen de 4 pour cent par an, en dépit de la dépression et de la guerre.

***** Étant donné surtout que ces données ne tiennent pas compte des transports routiers privés.

industries minière et manufacturière ne se sont élevés respectivement qu'à 450 et 350.

Les comparaisons auxquelles nous avons procédé, au sujet de la période 1929-1952, indiquent que l'activité des transports s'est développée beaucoup plus rapidement que la production industrielle aux États-Unis, mais un peu moins vite que cette dernière dans l'ensemble du monde. Il semble que cette différence entre l'évolution aux États-Unis et l'évolution mondiale soit imputable essentiellement à des taux d'accroissement différents de la circulation automobile. Ce dernier phénomène résulte probablement, dans une large mesure, de la disparité que l'on constate, du point de vue du niveau des revenus et du prix des carburants pour véhicules automobiles, entre les États-Unis et le reste du monde. Le relèvement du niveau des revenus dans le reste du monde devrait entraîner une intensification de la circulation automobile, surtout si le prix des carburants diminue de façon appréciable. Dans la présente étude, on a supposé qu'il se produira dans ce domaine un changement au moins modéré, c'est-à-dire que l'activité du secteur des transports augmentera à un taux égal à celui de l'industrie, soit 5 pour cent par an environ.

Agriculture

Les besoins en énergie de l'agriculture semblent devoir augmenter très lentement. Un indice approximatif de la production agricole mondiale montre que le taux d'accroissement du « produit » de ce secteur de l'économie a été inférieur à 1 pour cent par an au cours de la période 1913-1952. Il y a lieu de noter, cependant, que ce taux d'expansion ne permettrait pas à la production agricole mondiale d'augmenter au même rythme que la population mondiale, dont le taux d'accroissement annuel pourrait bien être de 1,5 pour cent. Étant donné que la production agricole est déjà sensiblement inférieure aux besoins mondiaux, il faudrait qu'elle augmentât d'au moins 2 pour cent par an pour permettre de combler les déficits existants et satisfaire les besoins de la population pendant le prochain demi-siècle. C'est là un taux d'accroissement qu'il est possible d'atteindre, comme le prouve le fait que le taux d'accroissement moyen de production agricole mondiale a été de 2,5 pour cent par an, au cours de la période quadriennale qui s'est terminée, en 1953-1954 [3].

Dans ces conditions, il semble plus raisonnable de prévoir un taux d'accroissement des besoins en énergie de l'agriculture de 2 pour cent, plutôt que l'un des taux inférieurs que l'on a enregistré dans le passé. On a donc adopté le taux de 2 pour cent dans la présente étude.

Besoins ménagers et autres

Les statistiques dont on dispose ne permettent pas de se rendre compte avec précision des variations qu'a subies le taux de consommation de l'énergie utilisée pour les besoins ménagers, ceux des établissements commerciaux, etc. Si la consommation d'énergie électrique, aisément mesurable, a augmenté très rapidement dans ce secteur, c'est en partie à cause de la demande croissante, mais aussi, dans une certaine mesure, parce que l'énergie électrique a remplacé d'autres sources d'énergie. Dans le cas de l'énergie thermique, le taux d'accroissement a certainement été moins rapide. Il est probable que la consommation d'énergie thermique s'est accrue au moins au même rythme que la population et, dans les pays où le revenu individuel a beaucoup augmenté, plus fortement que cette dernière.

Si l'on pose en principe que le relèvement des niveaux de vie s'accompagnera d'une augmentation au moins modérée de la consommation d'énergie thermique utilisée pour les besoins ménagers, on peut admettre que le taux d'accroissement de la consommation de cette forme d'énergie, pour les besoins ménagers, sera par exemple de 2 pour cent par an. Il y a tout lieu de croire que l'utilisation de la force motrice pour ces mêmes besoins augmentera à un rythme beaucoup plus accentué. Les données concernant la consommation de l'énergie électrique dans ce secteur montrent, en fait, que la consommation de cette forme d'énergie augmente plus rapidement que celle de presque toutes les autres formes, bien qu'elle ait déjà atteint un niveau très élevé : entre 1937 et 1952, le taux moyen d'accroissement annuel de la consommation d'électricité dans le secteur des besoins ménagers était d'environ 9 pour cent.

Ce taux d'accroissement, qui semble avoir été enregistré à la fois dans les pays industrialisés et dans les régions sous-développées au cours de ces dernières années, se maintiendra peut-être encore pendant quelques années, mais ralentira certainement par la suite, à mesure que le niveau de la consommation électrique dans chaque pays se rapprochera de son maximum possible. Étant donné qu'une augmentation de 6 pour cent par an seulement porterait la consommation moyenne de l'électricité utilisée pour les besoins ménagers à un niveau quelque peu supérieur au niveau moyen actuel de la consommation aux États-Unis, bien qu'inférieur à celui de la Norvège, on a adopté ce taux, moins élevé que celui de la Norvège, mais plus raisonnable pour les prévisions à long terme.

Chapitre III

BESOINS FUTURS EN ÉNERGIE

On a établi au chapitre II qu'à moins de conflit grave ou de crise économique, le taux d'accroissement des besoins totaux d'énergie utile se situait entre 4 et 6 pour cent par an. On a estimé ensuite que le taux d'accroissement des besoins en énergie

de chaque secteur de l'économie s'établissait comme suit :

	Pour cent
Agriculture	2
Industrie	5
Transports	5
Besoins ménagers : Chaleur	2
Énergie (force motrice)	6

Pour calculer ces taux, on a supposé que le taux maximum d'accroissement de la population mondiale serait de 1,5 pour cent par an. A ce rythme, l'effectif total de la population atteindrait environ 3 500 millions en 1975 et 5 milliards — soit le double de l'effectif actuel — en l'an 2000.

Dans le présent chapitre, on calculera les besoins de chaque secteur de l'économie en 1975 et en l'an 2000, en appliquant les taux du tableau ci-dessus aux chiffres du volume de la consommation utile d'énergie en 1952. On examinera ensuite les résultats en fonction des besoins humains dans chaque secteur de l'économie, pour déterminer si les chiffres en question sont raisonnables et ce qu'ils impliquent, le cas échéant, du point de vue des formes et des sources de l'énergie. Enfin, on additionnera les résultats concernant chaque secteur de l'économie, pour formuler des conclusions sur les points suivants : quantité d'énergie utile nécessaire pour faire face à tous les besoins en 1975 et en l'an 2000; formes sous lesquelles cette énergie devra être fournie; conséquences de ces facteurs sur les besoins en combustibles et autres sources d'énergie.

Industrie

On a été amené à conclure au chapitre II que le taux d'accroissement annuel des besoins en énergie de l'industrie serait vraisemblablement de 5 pour cent environ. En appliquant ce taux aux 5,8 milliards de mégawattheures d'énergie utilisée en 1952, on trouve que les besoins en énergie s'élèveront à 18 milliards de mégawattheures en 1975 et à 60 milliards en l'an 2000. La consommation par *habitant* atteindrait donc en moyenne 12 MWh en l'an 2000, contre une consommation moyenne, en 1952, de 2,3 MWh pour l'ensemble du monde et de 15,5 MWh pour les États-Unis d'Amérique.

Il est difficile d'évaluer comment ces besoins se répartiraient entre besoins en chaleur et besoins en force motrice. En 1952, l'industrie n'a utilisé directement sous forme de force motrice que 10 pour cent de l'énergie qu'elle a consommée. Il est probable que ce pourcentage augmentera encore pendant les années à venir, étant donné que la consommation de l'électricité dans l'industrie augmente plus rapidement que celle des autres sources d'énergie. Il se peut même que ce pourcentage augmente beaucoup du fait que l'électricité est la forme d'énergie qui se prête aux emplois les plus variés; en Norvège, en 1950, l'électricité a représenté près de la moitié de l'énergie fournie à l'industrie et vraisemblablement les deux tiers au moins de l'énergie utilement consommée dans ce secteur. Dans ces conditions et faute d'indications plus sûres, on peut supposer que l'électricité représentera un sixième de l'énergie utilisée dans l'industrie en 1975 et un cinquième de cette énergie en l'an 2000. La consommation industrielle d'électricité s'élèverait ainsi, à ces dates, à environ 3 milliards et 12 milliards de mégawattheures.

Abstraction faite de l'électricité, la seule source particulière d'énergie absolument indispensable à l'industrie en 1952 a été le coke métallurgique. Le reste de l'énergie utilisée dans le secteur industriel était tiré indifféremment des autres sources d'énergie disponibles — charbon, huiles minérales, gaz et même combustibles végétaux. Dans certains cas, les combustibles utilisés provenaient des ressources locales, dans d'autres, ils étaient importés de régions éloignées. Le facteur déterminant qui présidait au choix de la source d'énergie était sans doute simplement l'avantage économique que présentait telle ou telle source par rapport aux autres.

Il ne semble pas que l'on puisse s'attendre à une modification de cette situation au cours des années à venir. On continuera à avoir besoin de coke métallurgique, pour lequel les quantités nécessaires pourraient facilement passer de 200 millions de tonnes environ (en 1952) à 500 millions de tonnes en 1975 et à 1 500 millions de tonnes en l'an 2000. Il est vraisemblable cependant que les progrès technologiques réalisés dans la sidérurgie, s'accompagnant d'une augmentation de l'utilisation des métaux non ferreux, maintiendront la demande bien au-dessous de ces chiffres. On peut également s'attendre à une augmentation importante des besoins en électricité, mais il sera possible d'y faire face soit directement, au moyen de la houille blanche, soit indirectement, en transformant des combustibles en électricité. En ce qui concerne les autres sources d'énergie, il est probable que les besoins seront presque uniquement fonction des quantités disponibles, de leur coût et du niveau de ce coût par rapport à celui de l'énergie provenant d'autres combustibles.

Transports

Les besoins en énergie du secteur des transports, qui ont été équivalents à 0,8 milliard de mégawattheures en 1952, semblent devoir atteindre 2,5 milliards de mégawattheures en 1975 et environ 8 milliards de mégawattheures en l'an 2000. Dans ces conditions, la consommation moyenne *par habitant*, dans l'ensemble du monde, atteindrait 0,7 MWh environ en 1975 et 1,6 MWh en l'an 2000. Par comparaison, la consommation en énergie du secteur des transports aux États-Unis en 1952 a été légèrement supérieure en moyenne à 2,5 MWh par habitant.

Les sources d'énergie nécessaire aux transports en 1975 et en l'an 2000 pourront différer sensiblement de celles que ce secteur a utilisées en 1952. L'évolution récente montre que, dans toutes les formes de transport, on a tendance à abandonner les combustibles solides et le mazout au profit des

huiles provenant de la distillation du pétrole. Comme il s'agit d'une tendance des plus rationnelles qui améliore considérablement le rendement d'utilisation des combustibles, elle ne peut guère que se maintenir et s'accélérer. Pour peu qu'elle se poursuive à son rythme actuel, la plupart des moyens de transport seront mus en l'an 2000 par des moteurs à combustion interne utilisant des produits de la distillation du pétrole ou des gaz de pétrole liquéfiés. S'il en est ainsi, on peut prévoir des améliorations importantes du rendement d'utilisation des combustibles; la généralisation de la traction diesel pourrait faire passer le rendement moyen d'utilisation, qui était de 15 pour cent en 1952, à 25 pour cent en 1975 et peut-être même à 30 pour cent en l'an 2000. L'ensemble des besoins du secteur des transports en combustibles liquides serait ainsi de l'ordre de 800 millions de tonnes en 1975 et de 2 300 millions de tonnes en l'an 2000.

Agriculture

Les besoins en énergie de l'agriculture, qui ont été équivalents à 0,3 milliard de mégawattheures en 1952, semblent devoir atteindre respectivement 0,5 et 0,8 milliard de mégawattheures en 1975 et en l'an 2000. Dans ces conditions, la consommation *par habitant* d'énergie dans l'agriculture, qui était en moyenne d'un peu moins de 120 kWh en 1952, atteindrait 140 kWh environ en 1975 et 160 kWh en l'an 2000. Par comparaison, la consommation *par habitant* d'énergie dans l'agriculture, aux États-Unis d'Amérique, s'élevait en 1952 à environ 230 kWh.

La majeure partie de l'énergie utilisée en 1952 dans l'agriculture a été fournie par la main-d'œuvre et par des animaux de trait, mais ce secteur devra subir des transformations radicales pour pouvoir faire face de manière convenable aux besoins mondiaux en produits agricoles, au cours des années à venir. Le rendement du sol et la productivité de la main-d'œuvre agricole devront augmenter et les terres qui produisent actuellement du fourrage pour les animaux de trait devront de plus en plus servir à produire des denrées alimentaires.

Ces transformations requièrent une plus grande utilisation de l'énergie mécanique, destinée à compléter ou à remplacer l'énergie que fournissent actuellement la main-d'œuvre et les animaux de trait. C'est pourquoi il semble extrêmement probable qu'en l'an 2000, la plus grande partie de la force motrice utilisée dans l'agriculture sera fournie par des tracteurs et autres petites machines mobiles, comme c'est précisément le cas actuellement aux États-Unis d'Amérique. A moins qu'il ne soit possible d'utiliser l'énergie nucléaire dans l'agriculture, il est vraisemblable qu'en l'an 2000 l'énergie nécessaire à ce secteur de l'économie proviendra presque uniquement de produits de la distillation du pétrole. Dans ces conditions, l'ensemble des besoins de ces produits atteindra peut-être 100 millions de tonnes en 1975 et 250 millions en l'an 2000.

Besoins ménagers et autres

La quantité de chaleur requise pour les besoins ménagers, qui a été équivalente à 2,9 milliards de mégawattheures d'énergie en 1952, semble devoir atteindre l'équivalent de 4,6 milliards de mégawattheures en 1975 et de 7,5 milliards de mégawattheures en l'an 2000. En même temps, les besoins d'énergie devraient augmenter et passer de 0,4 milliard de mégawattheures à 1,5 milliard en 1975 et à 7 milliards en l'an 2000 *.

Dans ces conditions, la consommation mondiale de chaleur *par habitant* pour les besoins ménagers s'élèverait à peu près à l'équivalent de 1,5 MWh en l'an 2000, contre 1,2 MWh en 1952. La consommation d'énergie *par habitant* atteindrait en moyenne 1,4 MWh en l'an 2000, alors qu'elle s'élevait en 1952 à 1,1 MWh aux États-Unis d'Amérique et à près de 1,6 MWh en Norvège.

Il est vraisemblable qu'en l'an 2000 (tableau 15), l'énergie nécessaire à la satisfaction des besoins ménagers sera fournie presque entièrement par de l'électricité achetée à des réseaux de distribution. Cependant, la chaleur sera obtenue exactement dans les mêmes conditions qu'en 1952, c'est-à-dire à partir des sources qui offriront le plus d'avantages du point de vue économique ou du point de vue pratique.

Besoins totaux en énergie en 1975 et en l'an 2000

Les besoins totaux en énergie utile, pour les années 1975 et 2000, calculés d'après les besoins que l'on vient de déterminer pour chaque secteur, s'établissent comme le montre le tableau 15.

Tableau 15

Besoins potentiels en énergie utile, en 1975 et en l'an 2000, classés par secteurs économiques

(10^9 MWh, chiffres arrondis)

	1952 (chiffres effectifs)	1975	2000
Industrie	5,8	18	60
Transports	0,8	2,5	8
Agriculture	0,3	0,5	1
Besoins ménagers . . .	3,3	6	15
TOTAL	10,2	27	84

Il est peut-être plus utile d'exprimer ces besoins en fonction des *formes* d'énergie nécessaires; on

* En raison du caractère interchangeable de la chaleur et de l'énergie utilisées pour les besoins ménagers, le rapport entre ces deux éléments pourrait être sensiblement différent de celui qu'indiquent ces chiffres, surtout si les coûts relatifs du combustible et de l'énergie se modifient de façon considérable.

obtient les évaluations approximatives indiquées au tableau 16.

Tableau 16

Besoins potentiels en énergie utile, en 1975 et en l'an 2000, classés par forme d'énergie

(10^9 MWh, chiffres arrondis)

	1952 (chiffres effectifs)	1975	2000
Énergie stationnaire . .	1,0	5	19
Chaleur[a]	8,1	19	56
Énergie propulsive . .	1,1	3	9
TOTAL	10,2	27	84

[a] Y compris l'énergie chimique produite à partir du coke.

L'étude des besoins de chaque secteur économique en combustibles a montré que l'énergie propulsive — dont les chiffres figurent au tableau 16 — serait probablement obtenue dans une large mesure à partir des produits de la distillation du pétrole, tandis qu'une partie de la chaleur nécessaire — l'équivalent de 2 milliards de mégawattheures en 1975 et de 7 milliards de mégawattheures sans doute en l'an 2000 — serait probablement fournie par du coke métallurgique. Les autres besoins en chaleur, évalués à l'équivalent de 17 milliards de mégawattheures pour 1975 et de 49 milliards de mégawattheures pour l'an 2000, pourraient être satisfaits, de même que tous les besoins en énergie stationnaire, au moyen d'autres sources d'énergie disponibles. Si l'on ne fait pas entrer la question des sources d'énergie en ligne de compte, on peut donc estimer que la quantité totale d'énergie nécessaire s'élèvera à 22 milliards de mégawattheures en 1975 et à 68 milliards en l'an 2000.

Le volume des combustibles nécessaires pour obtenir cette masse d'énergie dépendra dans une large mesure des sources d'énergie disponibles, ainsi que de leur rendement d'utilisation. Si l'on n'utilise que les sources classiques et si leur rendement d'utilisation continue de s'améliorer à un rythme suffisant, on peut prévoir que l'ensemble des besoins en sources d'énergie de cette nature augmentera et passera de l'équivalent d'environ 3 milliards de tonnes de charbon en 1952 à l'équivalent d'environ 5,5 milliards en 1975 * et d'environ 15 milliards en l'an 2000 **. L'ensemble des besoins en combustibles et en énergie pourrait donc s'établir à peu près comme l'indique le tableau 17.

Tableau 17

Besoins totaux en combustibles et en énergie, en 1975 et en l'an 2000

(Équivalence calculée en milliards de tonnes de charbon)

	1952	1975	2000
Coke métallurgique destiné à l'industrie . .		0,5	1,3
Produits de la distillation du pétrole destinés à l'industrie et à l'agriculture		1,4	3,7
Toute autres sources d'énergie		5,6	15
TOTAL	3,6	7,5	20

En 1975, les besoins en énergie *utile* seront donc probablement trois fois plus grands qu'ils ne l'ont été en 1952 et, en l'an 2000, huit fois plus grands. Cependant, il suffira que la production de combustibles augmente d'environ 3,5 pour cent par an pour satisfaire ces besoins élevés. S'il se révélait économiquement possible d'utiliser l'énergie nucléaire pour la production d'énergie ou de chaleur, ou de l'une et l'autre, les besoins totaux en combustibles pourraient naturellement être d'un ordre totalement différent.

Pour toutes les estimations qui précèdent, on a supposé que le progrès s'effectuerait à un rythme constant dans chacun des secteurs de l'économie pendant toute la période considérée. Cette supposition n'est pas invraisemblable en ce qui concerne la période 1952 à 1975, mais l'hypothèse d'un taux d'accroissement élevé qui se maintiendrait pendant près d'un demi-siècle semble être assez audacieuse. Elle implique l'existence d'un monde qui ne connaîtrait ni grave conflit, ni dépression économique importante, et où le capital, non seulement s'accumulerait à un rythme satisfaisant, mais circulerait librement d'un pays à l'autre. C'est là une perspective assurément optimiste, mais qu'il faut néanmoins envisager si l'on veut éviter de sous-estimer les besoins mondiaux d'énergie, ce qui pourrait être très grave étant donné la diminution de certaines des ressources.

* On a supposé que le rendement moyen d'utilisation du combustible serait de 30 pour cent pour la production d'électricité (contre 22 pour cent en 1952) et de 60 pour cent pour la production de chaleur (contre 50 pour cent en 1952).

** On a supposé que le rendement moyen d'utilisation serait de 40 pour cent pour la production d'électricité et de 70 pour cent pour la production de chaleur.

ANNEXE

A. Note générale sur la mesure de l'énergie

Toutes les formes et sources d'énergie dont il est question dans cette étude ont été mesurées en mégawattheures ou kilowattheures, en partie parce que ce sont-là les unités qui semblent le plus utilisées pour mesurer l'énergie nucléaire et, en partie, parce que les unités électriques, qui sont les seules unités universellement utilisées pour mesurer l'énergie, peuvent servir également de mesure du travail.

L'équivalence entre le mégawattheure et les autres unités électriques ou unités de mesure de l'énergie est la suivante :

1 mégawattheure = 1 000 kilowattheures (kWh)
» = 1 000 000 wattheures
» = 860 000 * kilocalories (kcal).
» = 3 412 000 * British thermal units (Btu).

Les coefficients utilisés pour convertir les divers combustibles en leurs équivalents électriques — calcul effectué d'après la valeur calorifique approximative de chaque combustible — sont indiqués au tableau A.

Tableau A

Équivalence électrique [a]

(Valeur en énergie théorique totale calculée en kWh pour chaque unité indiquée)

Charbon et agglomérés de charbon	8,0	par kilogramme
Coke	7,2	»
Houille brune et lignite	2,5	»
Tourbe	4,0	»
Gaz de four	4,8	par mètre cube
Gaz naturel	10,6	»
Gaz de pétrole liquéfié	13,3	par kilogramme
Gaz de raffinerie	14,0	par mètre cube
Essence, Pétrole lampant, Fuel-oil, Mazout	12,0	par kilogramme
Bois et déchets de scierie	4,0	par kilogramme
Bagasse	4,0	»
Autres déchets végétaux	4,0	»
Agglomérés de lignite	5,2	»

[a] Valeurs moyennes approchées. Ces chiffres ont été appliqués aux données mondiales, mais ils ne sont pas nécessairement applicables aux données concernant certains pays, en raison surtout de la variation de la valeur en énergie du charbon et de certains lignites.

Tous les combustibles mentionnés ci-dessus, à l'exception de la tourbe, de la bagasse, du bois de chauffage, des déchets de scierie et des « autres combustibles végétaux », sont classés dans les sources « commerciales » d'énergie, c'est-à-dire dans celles qui font ordinairement l'objet de transactions commerciales, par opposition aux combustibles qui sont consommés dans une large mesure par leurs producteurs. L'énergie hydroélectrique est également considérée comme une source commerciale d'énergie.

Au moyen de la table d'équivalence et du tableau A, on peut calculer directement l'équivalence *combustible* de toutes les quantités données dans le présent mémoire en équivalence électricité, mais, dans certains cas, il y aura lieu de modifier le résultat ainsi obtenu, afin de tenir compte du rendement d'utilisation du combustible. Par exemple, l'équivalent charbon de la *quantité d'énergie consommée* pourra être directement calculé en divisant le nombre en question par 8, mais l'équivalent charbon de la *quantité d'énergie effectivement utilisée* exigera qu'une correction soit faite pour tenir compte du rendement d'utilisation de la source d'énergie en question, dans l'emploi qui en est fait.

On a compté pour 150 kWh par an, soit approximativement 0,5 kWh par jour, l'équivalent électrique du travail d'un être humain. Le travail fourni par les animaux de trait a été compté pour 500 kWh par an, pour chaque unité de trait (mule ou équivalent).

* Valeur approchée.

B. Sources et méthodes utilisées pour le chapitre I

Pour le tableau de la situation en énergie en 1952, esquissé au chapitre I, on a utilisé :

1. Des données détaillées sur la production d'énergie dans tous les pays, à l'exception de l'U.R.S.S., de la Chine continentale et des pays de l'Europe orientale. Ces données, qui ont servi pour le premier tableau, consistaient en chiffres relativement complets sur la production, la transformation et le commerce des combustibles et de l'énergie dans chacun des pays en question.

2. Des statistiques relativement complètes concernant l'utilisation de l'énergie dans 24 pays, qui en 1952 ont consommé 64 pour cent de l'énergie produite dans le monde.

3. Des renseignements d'origines diverses, relatifs à la distribution de sources d'énergie particulières (charbon et électricité par exemple), à la consommation d'énergie par des utilisateurs spéciaux (chemins de fer et navires marchands par exemple) et aux quantités d'énergie achetées ou vendues dans les pays qui ne sont pas mentionnés au paragraphe 2 ci-dessus.

Pour compléter ces données, on a procédé le cas échéant à des évaluations :

1. De la quantité de combustibles consommée dans des installations qui les transforment, ainsi que dans les centrales électriques; ce calcul a été effectué d'après le rapport normal ou ordinaire entre la consommation et la production.

2. De la production et de la consommation de certains combustibles végétaux, calculées en partie d'après les renseignements publiés par la FAO et en partie d'après certaines hypothèses relatives à la quantité minimum d'énergie nécessaire aux besoins ménagers.

3. Des ventes de combustibles et d'énergie à divers groupes de consommateurs, calculées *a*) d'après les chiffres relatifs à d'autres années que 1952,

ou *b*) d'après la nature des combustibles sur lesquels on ne possède pas de chiffres. En ce qui concerne ces derniers, on a supposé que les utilisations auxquelles ils étaient destinés étaient les suivantes :

Combustible	*Utilisation*
Coke métallurgique	Industrie
Tourbe	Besoins ménagers
Coke d'usine à gaz	Besoins ménagers
Essence avion	Transport aérien
Essence auto	Transports routiers (et tracteurs)
Pétrole lampant	Besoins ménagers (et tracteurs)
Huile diesel	Transports routiers (tracteurs, industrie)
Mazout	Industrie (ou transports ferroviaires)
Gaz manufacturé	Besoins ménagers essentiellement
Gaz de four à coke	Industrie essentiellement
Électricité	Besoins ménagers et industrie
Bagasse	Industrie
Déchets de scierie	Industrie
Bois de chauffage	Besoins ménagers
Autres combustibles végétaux	Besoins ménagers
Carburant pour moteurs à réaction	Besoins militaires

Les données dont on dispose sur la répartition des combustibles et de l'énergie ne permettent pas de déterminer complètement tous leurs usages. On a donc dû classer certains de ces usages de la manière suivante :

Besoins ménagers : La rubrique comprend les établissements commerciaux et les établissements ouverts au public, l'éclairage des rues et les besoins des exploitations agricoles.

Industrie : La rubrique comprend l'industrie manufacturière et minière et la transformation des combustibles, mais non les centrales électriques.

Transports : La rubrique comprend les bateaux et les aéronefs civils.

Le carburant pour moteurs à réaction et les autres combustibles utilisés à des fins militaires ont été classés dans la catégorie « emploi non précisé », en raison du caractère incomplet des renseignements concernant leur utilisation.

La méthode ci-dessus a permis de calculer avec une exactitude que l'on peut estimer suffisante la quantité d'énergie produite et distribuée dans le monde, exception faite des pays de l'Europe orientale, de l'U.R.S.S. et de la Chine continentale. Le détail des chiffres en question est donné aux tableaux C1 et C2.

Les données sur l'utilisation effective de l'énergie, qui figurent au tableau C3, ont exigé des calculs spéciaux. Pour établir les chiffres en question, on a pris en considération les quantités de combustible et d'énergie consommées dans les divers secteurs de l'économie, ainsi que le rendement d'utilisation de chacune de ces sources d'énergie dans chaque secteur. On a déterminé les rendements après avoir procédé à une analyse des études approfondies effectuées sur l'approvisionnement en énergie et son utilisation aux États-Unis d'Amérique [4] en Belgique [5] et en Allemagne [6], et après avoir étudié les données relatives au rendement, tirées de nombreuses autres sources. Ces rendements d'utilisation, qui supposent tous un rendement d'utilisation de l'énergie électrique égal à 100 pour cent *, s'établissent comme on l'indique au tableau B.

Tableau B

Rendements d'utilisation de l'énergie

Agriculture	
Pétrole lampant	0,20
Essence	0,20
Fuel-oil provenant de la distillation du pétrole	0,25
Besoins ménagers	
Charbon, lignite et coke	0,40
Tourbe	0,30
Combustibles végétaux	0,20
Pétrole lampant	0,50
Autres huiles minérales	0,60
Gaz et gaz de pétrole liquéfié	0,60
Électricité	1,00
Industrie	
Combustibles minéraux solides	0,55
Bois de chauffage	0,40
Fuel-oil provenant de la distillation du pétrole et du mazout	0,60
Essence et pétrole lampant	0,20
Gaz (y compris les gaz de pétrole liquéfiés)	0,80
Combustibles végétaux	0,40
Électricité	1,00
Transports	
Transports ferroviaires	
Charbon, lignite, agglomérés, coke	0,04
Tourbe	0,03
Bois de chauffage	0,02
Fuel-oil provenant de la distillation du pétrole	0,25
Essence	0,20
Électricité	1,00
Transports routiers	
Essence, gaz naturel	0,20
Fuel-oil provenant de la distillation du pétrole	0,25
Transports maritimes	
Fuel-oil provenant de la distillation du pétrole	0,25
Divers (mazout, charbon, essence avion)	0,29
Transports aériens	
Essence avion et carburants pour moteurs à réaction	0,20
Pipelines	
Fuel-oil provenant de la distillation du pétrole	0,25
Gaz naturel	0,25
Navigation intérieure	
Fuel-oil provenant de la distillation du pétrole	0,25
Divers (combustibles solides, mazout)	0,20

* En admettant que l'énergie électrique est utilisée avec son rendement potentiel maximum, ce qui n'est pas absolument vrai.

Tableau C1

Production mondiale[a] d'énergie en 1952

Quantités réelles et équivalents électriques (10^6 MWh)

	Production	Volume entreposé ou non précisé	Consommation brute[b]	Consommation sous forme de matière première						Consommation à titre de source d'énergie (force motrice)
				Total	Fours à coke	Usines à gaz	Agglomérés de charbon	Raffineries	Centrales thermiques	
Charbon et briquettes										
(Millions de tonnes)	1 104,1	16,5	1 095,2	462,8	221,7	51,9	—	—	189,2	632,4
(Équiv. élec.)	8 832,8	132,0	8 761,6	3 702,4	1 773,6	415,2	—	—	1 513,6	5 059,2
Lignite										
(Millions de tonnes)	124,4	1,2	123,2	72,9	2,1	—	35,7	—	35,1	50,3
(Équiv. élec.)	311,0	3,0	308,0	182,3	5,2	—	89,3	—	87,8	125,7
Agglomérés de lignite										
(Millions de tonnes)	(17,1)	—	(17,1)	0,5	—	—	—	—	0,5	16,6
(Équiv. élec.)	(89,0)	—	(89,0)	2,6	—	—	—	—	2,6	86,4
Tourbe										
(Millions de tonnes)	7,7	—	7,7	0,7	—	—	—	—	0,7	7,0
(Équiv. élec.)	30,8	—	30,8	2,8	—	—	—	—	2,8	28,0
Coke de four										
(Millions de tonnes)	(158,8)	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Coke d'usine à gaz										
(Millions de tonnes)	(35,9)	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Autre coke et poussiers de coke										
(Millions de tonnes)	(4,6)	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Total du coke										
(Millions de tonnes)	(199,3)	9,0	(190,3)	9,3	—	8,8	—	—	0,5	181,0
(Équiv. élec.)	(1 434,9)	64,8	(1 370,1)	66,9	—	63,3	—	—	3,6	1 303,2
Ensemble des combustibles minéraux solides										
(Équiv. élec.)	9 174,6	199,8	9 100,4	3 957,0	1 778,8	478,5	89,3	—	1 610,4	6 602,5
Pétrole brut et huile de schiste										
(Millions de tonnes)	566,5	—	566,5	566,5	—	—	—	566,5	—	—
(Équiv. élec.)	6 798,0	—	6 798,0	6 798,0	—	—	—	6 798,0	—	—
Essence ordinaire.										
(Millions de tonnes)	14,3	—	14,3	14,3	—	—	—	14,3	—	—
(Équiv. élec.)	171,6	—	171,6	171,6	—	—	—	171,6	—	—
Gaz de pétrole liquéfiés										
(Millions de tonnes)	(10,3)	3,5	(6,8)	0,5	—	0,5	—	—	—	6,3
(Équiv. élec.)	(137,0)	46,6	(90,4)	6,7	—	6,7	—	—	—	83,7
Essence avion et carburant pour moteur à réaction										
(Millions de tonnes)	(13,9)	7,8	(6,1)	0,4	—	—	—	0,4	—	5,7
(Équiv. élec.)	(166,8)	93,6	(73,2)	4,8	—	—	—	4,8	—	68,4
Essence auto										
(Millions de tonnes)	(174,2)	9,3	(164,9)	1,8	—	—	—	1,8	—	163,1
(Équiv. élec.)	(2 090,4)	111,6	(1 978,8)	21,6	—	—	—	21,6	—	1 957,2
Pétrole lampant										
(Millions de tonnes)	(30,1)	1,0	(29,1)	1,4	—	—	—	1,4	—	27,7
(Équiv. élec.)	(361,2)	12,0	(349,2)	16,8	—	—	—	16,8	—	332,4
Fuel-oil provenant de la distillation du pétrole										
(Millions de tonnes)	(109,5)	8,8	(100,7)	2,8	—	1,2	—	0,3	1,3	97,9
(Équiv. élec.)	(1 314,0)	105,6	(1 208,4)	33,6	—	14,4	—	3,6	15,6	1 174,8
(Ensemble des produits de la distillation du pétrole, etc.)										
(Millions de tonnes)	(338,0)	(30,4)	(307,6)	(6,9)	—	(1,7)	—	(3,9)	(1,3)	(300,7)
(Équiv. élec.)	(4 069,4)	(369,4)	(3 700,0)	(83,5)	—	(21,1)	—	(46,8)	(15,6)	(3 616,5)
Mazout										
(Millions de tonnes)	(178,5)	14,7	(163,8)	19,6	—	1,3	—	—	18,3	144,2
(Équiv. élec.)	(2 142,0)	176,4	(1 965,6)	235,2	—	15,6	—	—	219,6	1 730,4
Total des combustibles liquides										
(Équiv. élec.)	6 969,6	545,8	6 969,6	7 288,3	—	36,7	—	7 016,4	235,2	5 346,9
Gaz des raffineries										
(Milliards de m³)	(10,3)	—	(10,3)	—	—	—	—	—	—	10,3
(Équiv. élec.)	(144,2)	—	(144,2)	—	—	—	—	—	—	144,2

Tableau C1 *(fin)*

	Production	Volume entreposé ou non précisé	Consommation brute [b]	Consommation sous forme de matière première						Consommation à titre de source d'énergie (force motrice)
				Total	Fours à coke	Usines à gaz	Agglomérés de charbon	Raffineries	Centrales thermiques	
Gaz naturel										
(Milliards de m³)	236,8	22,7	214,1	26,5	—	0,5	—	—	26,0	187,6
(Équiv. élec.)	2 510,1	240,6	2 269,5	280,9	—	5,3	—	—	275,6	1 988,6
Gaz de four										
(Milliards de m³)	(99,5)	10,5	(89,0)	0,6	—	—	—	—	0,6	88,4
(Équiv. élec.)	(477,6)	50,4	(427,2)	2,9	—	—	—	—	2,9	424,3
Total des gaz										
(Équiv. élec.)	2 510,1	291,0	2 269,5	283,8	—	5,3	—	—	278,5	2 557,1
Électricité										
(Millions de MWh)										
Énergie hydroélectrique fournie par les compagnies										
(Millions de MWh)	336,6	—	336,6	—	—	—	—	—	—	336,6
Énergie hydroélectrique fournie par les entreprises										
(Millions de MWh)	39,8	—	39,8	—	—	—	—	—	—	39,8
Total de l'énergie hydroélectrique										
(Millions de MWh)	(376,4)	—	(376,4)	—	—	—	—	—	—	376,4
Énergie thermo-électrique fournie par les compagnies										
(Millions de MWh)	(461,0)	—	(461,0)	—	—	—	—	—	—	461,0
Total de l'énergie électrique										
(Millions de MWh)	376,4	—	376,1	—	—	—	—	—	—	718,4 [c]
Bois de chauffage										
(Millions de m³)	426,6	—	426,6	5,9	—	—	—	—	5,9	420,7
(Équiv. élec.)	853,2	—	853,2	11,8	—	—	—	—	11,8	841,4
Déchets de scieries										
(Millions de m³)	177,6	—	177,6	—	—	—	—	—	—	177,6
(Équiv. élec.)	355,2	—	355,2	—	—	—	—	—	—	355,2
Bagasse										
(Millions de tonnes)	26,7	—	26,7	—	—	—	—	—	—	26,7
(Équiv. élec.)	106,8	—	106,8	—	—	—	—	—	—	106,8
Autres combustibles végétaux										
(Millions de tonnes)	454,2	—	454,2	—	—	—	—	—	—	454,2
(Équiv. élec.)	1 741,8	—	1 741,8	—	—	—	—	—	—	1 741,8
Total des combustibles végéaux										
(Équiv. élec.)	3 057,0	—	3 057,0	11,8	—	—	—	—	11,8	3 045,2
Total de l'énergie non animale										
(Équiv. élec.)	22 087,7	1 036,6	21 772,6	11 540,9	1 778,8	520,5	89,3	7 016,4	2 135,9	18 270,1
Travail de l'énergie des animaux de trait										
(Équiv. élec.)	85,6	—	85,6	—	—	—	—	—	—	85,6
Travail humain										
(Équiv. élec.)	173,0	54,0	119,0	—	—	—	—	—	—	119,0
Total de l'énergie animale										
(Équiv. élec.)	258,6	54,0	204,6	—	—	—	—	—	—	204,6
ÉNERGIE TOTALE										
(Équiv. élec.)	22 346,3	1 090,6	21 977,2	11 540,9	1 778,8	520,5	89,3	7 016,4	2 135,9	18 474,7

[a] Non compris l'Europe orientale, l'U.R.S.S. et la Chine continentale. Pour les évaluations de la production dans cette zone, voir l'annexe.

[b] Y compris le montant net des importations de charbon en provenance d'Europe orientale, soit 7,6 millions de tonnes (équivalant à 60,8 millions de mégawattheures); non compris 0,3 million de mégawattheures d'électricité exportés à destination de l'Europe orientale. Les totaux excluent les combustibles ayant subi des transformations, ainsi que l'energie thermoélectrique.

[c] Non compris 118,7 millions de mégawattheures perdus en cours de transport, etc.

Tableau C2

Consommation mondiale[a] d'énergie en 1952

Quantités effectives et équivalents électriques (10^6 MWh)

	Total	Agriculture Total	Transports							Industrie Total	Besoins ménagers et autres Total
			Total	Transports aériens intérieurs	Transports routiers	Transports ferroviaires	Pipelines	Navigation intérieure et pêche	Transports maritimes internationaux		
Charbon (et agglomérés)											
(Millions de tonnes) . .	632,4	—	138,9	—	—	127,3	—	3,8	7,8	295,9	197,6
(Équiv. élec.)	5 059,2	—	1 111,2	—	—	1 018,4	—	30,4	62,4	2 367,2	1 580,8
Lignite											
(Millions de tonnes) . .	50,3	—	3,3	—	—	3,3	—	—	—	36,8	10,2
(Équiv. élec.)	125,7	—	8,2	—	—	8,2	—	—	—	92,0	25,5
Agglomérés de lignite											
(Millions de tonnes) . .	16,6	—	0,4	—	—	0,3	—	0,1	—	5,9	10,3
(Équiv. élec.)	86,4	—	2,1	—	—	1,6	—	0,5	—	30,7	53,6
Tourbe											
(Millions de tonnes) . .	7,0	—	0,1	—	—	0,1	—	—	—	—	6,9
(Équiv. élec.)	28,0	—	0,4	—	—	0,4	—	—	—	—	27,6
Coke (Total)											
(Millions de tonnes) . .	181,0	—	0,6	—	—	0,5	—	0,1	—	150,7	29,7
(Équiv. élec.)	1 303,2	—	4,3	—	—	3,6	—	0,7	—	1 085,0	213,9
Total des combustibles minéraux solides											
(Équiv. élec.)	6 602,5	—	1 126,2	—	—	1 032,2	—	31,6	62,4	3 574,9	1 901,4
Gaz de pétrole liquéfiés											
(Millions de tonnes) . .	6,3	—	0,8	—	0,8	—	—	—	—	0,7	4,8
(Équiv. élc.)	83,7	—	10,6	—	10,6	—	—	—	—	9,3	63,8
Essence avion et carburant pour moteur à réaction											
(Millions de tonnes) . .	5,7	—	5,7	3,5	—	—	—	—	2,2	—	—
(Équiv. élec.)	68,4	—	68,4	42,0	—	—	—	—	26,4	—	—
Essence auto											
(Millions de tonnes) . .	163,1	11,9	148,8	—	146,4	0,1	—	2,3	—	2,4	—
(Équiv. élec.)	1 957,2	142,8	1 785,6	—	1 756,8	1,2	—	27,6	—	28,8	—
Pétrole lampant											
(Millions de tonnes) . .	27,7	2,3	1,1	—	—	—	—	1,1	—	0,5	23,8
(Équiv. élec.)	332,4	27,6	13,2	—	—	—	—	13,2	—	6,0	285,6
Fuel-oil provenant de la distillation du pétrole											
(Millions de tonnes) . .	97,9	3,9	31,7	—	7,6	10,7	0,4	3,5	9,5	16,8	45,5
(Équiv. élec.)	1 174,8	46,8	380,4	—	91,2	128,4	4,8	42,0	114,0	201,6	546,0
(Ensemble des produits résultant de la distillation du pétrole)											
(Millions de tonnes) . .	(300,7)	(18,1)	(188,1)	(3,5)	(154,8)	(10,8)	(0,4)	(6,9)	(11,7)	(20,4)	(74,1)
(Équiv. élec.)	(3 616,5)	(217,2)	(2 258,2)	(42,0)	(1 858,6)	(129,6)	(4,8)	(82,8)	(140,4)	(245,7)	(895,4)
Mazout											
(Millions de tonnes) . .	144,2	—	60,4	—	—	14,4	—	6,8	39,2	69,4	14,4
(Équiv. élec.)	1 730,4	—	724,8	—	—	172,8	—	81,6	470,4	832,8	172,8
Total des combustibles liquides											
(Équiv. élec.)	5 346,9	217,2	2 983,0	42,0	1 858,6	302,4	4,8	164,4	610,8	1 078,5	1 068,2
Gaz des raffineries											
(Milliards de m³) . . .	10,3	—	—	—	—	—	—	—	—	10,3	—
(Équiv. élec.)	144,2	—	—	—	—	—	—	—	—	144,2	—
Gaz naturel											
(Milliards de m³) . . .	187,6	—	6,0	—	0,1	—	5,9	—	—	119,2	62,4
(Équiv. élec.)	1 988,6	—	63,6	—	1,1	—	62,5	—	—	1 263,6	661,4
Gaz de four											
(Milliards de m³) . . .	88,4	—	—	—	—	—	—	—	—	62,8	25,6
(Équiv. élec.)	424,3	—	—	—	—	—	—	—	—	301,4	122,9
Total des gaz											
(Équiv. élec.)	2 557,1	—	63,6	—	1,1	—	62,5	—	—	1 709,2	784,3

Tableau C2 (*fin*)

	Total	Agriculture Total	Transports Total	Transports aériens intérieurs	Transports routiers	Transports ferroviaires	Pipelines	Navigation intérieure et pêche	Transports maritimes internationaux	Industrie Total	Besoins ménagers et autres Total
Énergie électrique (Millions de MWh) . . .	718,4	—	23,5	—	—	23,5	—	—	—	405,2	289,7
Bois de chauffage (Millions de m³). . . .	420,7	—	20,8	—	—	20,8	—	—	—	27,0	372,9
(Équiv. élec.)	841,4	—	41,6	—	—	41,6	—	—	—	54,0	745,8
Déchets de scierie (Millions de m³)	177,6	—	—	—	—	—	—	—	—	177,6	—
(Équiv. élec.)	355,2	—	—	—	—	—	—	—	—	355,2	—
Bagasse (Millions de tonnes) . .	26,7	—	—	—	—	—	—	—	—	26,7	—
(Équiv. élec.)	106,8	—	—	—	—	—	—	—	—	106,8	—
Autres combustibles végétaux (Millions de tonnes) . .	454,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	454,2
(Équiv. élec.)	1 741,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1 741,8
Total des combustibles végétaux (Équiv. élec.)	3 045,2	—	41,6	—	—	41,6	—	—	—	516,0	2 487,6
Total de l'énergie non animale (Équiv. élec.)	18 270,1	217,2	4 237,9	42,0	1 859,7	1 399,7	67,3	196,0	673,2	7 293,8	6 531,2
Travail de l'énergie des animaux de trait (Équiv. élec.)	85,6	85,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Travail humain (Équiv. élec.)	119,0	70,0	—	—	—	—	—	—	—	10,0	39,0
Total de l'énergie animale (Équiv. élec.)	204,6	155,6	—	—	—	—	—	—	—	10,0	39,0
ÉNERGIE TOTALE (Équiv. élec.)	18 474,7	372,8	4 237,9	42,0	1 859,7	1 399,7	67,3	196,0	673,2	7 293,8	6 570,2

[a] Non compris l'Europe orientale, l'U.R.S.S. et la Chine continentale.

Étant donné que l'énergie animale a été calculée sur la base du travail fourni par les êtres humains et les animaux de trait, l'énergie produite est nécessairement identique au travail effectué. Si cette énergie devait s'exprimer en fonction de la consommation alimentaire, on aboutirait à un indice égal à 0,05.

Ces rendements ne sont pas uniformément applicables à tous les pays. En outre, ils ne portent que sur la transformation initiale de la source d'énergie en chaleur ou en force motrice; ils ne tiennent pas compte des utilisations secondaires que l'on peut faire de la chaleur, ni des imperfections dans l'utilisation des machines * ou des économies qui pourraient résulter de l'utilisation de matériaux calorifuges.

Si l'on fait abstraction de ces facteurs, il semble que les coefficients de rendement indiqués ci-dessus traduisent avec une exactitude suffisante le rendement d'utilisation des sources d'énergie dans l'ensemble du monde; on les a par conséquent utilisés pour calculer les chiffres de l'utilisation d'énergie *effective* figurant au tableau C3.

La méthode indiquée ci-dessus n'ayant permis d'obtenir des statistiques relativement satisfaisantes que pour la plupart des pays du monde, on a dû compléter le tableau général en procédant à des évaluations grossières en ce qui concerne les pays de l'Europe orientale, l'U.R.S.S. et la Chine continentale. On a effectué ces évaluations en utilisant les renseignements dont on dispose sur la production et le commerce de ces pays et ce que l'on

* Par exemple, le facteur charge des trains et des bateaux-citernes.

Tableau C3

Utilisation mondiale[a] de l'énergie en 1952

(10^6 MWh)

	Total	Agriculture Total	Transports							Industries[b] Total	Besoins ménagers etc. Total
			Total	Transports aériens intérieurs	Transports routiers	Transports ferroviaires	Pipelines	Navigation intérieure et pêche	Transports maritimes internationaux		
Charbon et agglomérés											
Utilisation totale . . .	5 059,2	—	1 111,2	—	—	1 018,4	—	30,4	62,4	2 367,2	1 580,8
» effective . .	1 993,6	—	59,3	—	—	40,7	—	6,1	12,5	1 302,0	632,3
Lignite											
Utilisation totale . . .	125,7	—	8,2	—	—	8,2	—	—	—	92,0	25,5
» effective . .	61,1	—	0,3	—	—	0,3	—	—	—	50,6	10,2
Agglomérés de lignite											
Utilisation totale . . .	86,4	—	2,1	—	—	1,6	—	0,5	—	30,7	53,6
» effective . .	38,5	—	0,2	—	—	0,1	—	0,1	—	16,9	21,4
Tourbe											
Utilisation totale . . .	28,0	—	0,4	—	—	0,4	—	—	—	—	27,6
» effective . .	8,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8,3
Coke											
Utilisation totale . . .	1 303,2	—	4,3	—	—	3,6	—	0,7	—	1 085,0	213,9
» effective . .	682,6	—	0,2	—	—	0,1	—	0,1	—	596,8	85,6
Total des combustibles minéraux solides											
Utilisation totale . . .	6 602,5	—	1 126,2	—	—	1 032,2	—	31,6	62,4	3 574,9	1 901,4
» effective . .	2 784,1	—	60,0	—	—	41,2	—	6,3	12,5	1 966,3	757,8
Gaz de pétrole liquéfiés											
Utilisation totale . . .	83,7	—	10,6	—	10,6	—	—	—	—	9,3	63,8
» effective . .	47,8	—	2,1	—	2,1	—	—	—	—	7,4	38,3
Essence avion et carburant pour moteur à réaction											
Utilisation totale . . .	68,4	—	68,4	42,0	—	—	—	—	26,4	—	—
» effective . .	13,7	—	13,7	8,4	—	—	—	—	5,3	—	—
Essence auto											
Utilisation totale . . .	1 957,2	142,8	1 785,6	—	1 756,8	1,2	—	27,6	—	28,8	—
» effective . .	391,3	28,5	357,0	—	351,3	0,2	—	5,5	—	5,8	—
Pétrole lampant											
Utilisation totale . . .	332,4	27,6	13,2	—	—	—	—	13,2	—	6,0	285,6
» effective . .	152,1	5,5	2,6	—	—	—	—	2,6	—	1,2	142,8
Fuel-oil provenant de la distillation du pétrole											
Utilisation totale . . .	1 174,8	46,8	380,4	—	91,2	128,4	4,8	42,0	114,0	201,6	546,0
» effective . .	555,4	11,7	95,1	—	22,8	32,1	1,2	10,5	28,5	121,0	327,6
(Ensemble des produits résultant de la distillation du pétrole, etc.)											
Utilisation totale . . .	(3 616,5)	(217,2)	(2 258,2)	(42,0)	(1 858,6)	(129,6)	(4,8)	(82,8)	(140,4)	(245,7)	(895,4)
» effective . .	(1 160,3)	(45,7)	(470,5)	(8,4)	(376,2)	(32,3)	(1,2)	(18,6)	(33,8)	(135,4)	(508,7)
Mazout											
Utilisation totale . . .	1 730,4	—	724,8	—	—	172,8	—	81,6	470,4	832,8	172,8
» effective . .	722,2	—	118,9	—	—	8,6	—	16,3	94,0	499,6	103,7
Total des combustibles liquides											
Utilisation totale . . .	5 346,9	217,2	2 983,0	42,0	1 858,6	302,4	4,8	164,4	610,8	1 078,5	1 068,2
» effective . .	1 882,5	45,7	589,4	8,4	376,2	40,9	1,2	34,9	127,8	635,0	612,4
Gaz des raffineries											
Utilisation totale . . .	144,2	—	—	—	—	—	—	—	—	144,2	—
» effective . .	115,4	—	—	—	—	—	—	—	—	115,4	—
Gaz naturel											
Utilisation totale . . .	1 988,6	—	63,6	—	1,1	—	62,5	—	—	1 263,6	661,4
» effective . .	1 423,6	—	15,8	—	0,2	—	15,6	—	—	1 010,9	396,9
Gaz de four											
Utilisation totale . . .	424,3	—	—	—	—	—	—	—	—	301,4	122,9
» effective . .	315,0	—	—	—	—	—	—	—	—	241,2	73,8
Total des gaz											
Utilisation totale . . .	2 557,1	—	63,6	—	1,1	—	62,5	—	—	1 709,2	784,3
» effective . .	1 854,0	—	15,8	—	0,2	—	15,6	—	—	1 367,5	470,7

Tableau C3 (*fin*)

	Total	Agriculture Total	Transports Total	Transports aériens intérieurs	Transports routiers	Transports ferroviaires	Pipelines	Navigation intérieure et pêche	Transports maritimes internationaux	Industries [b] Total	Besoins ménagers etc. Total
Énergie électrique											
Utilisation totale . . .	718,4	—	23,5	—	—	23,5	—	—	—	405,2	289,7
» effective . .	718,4	—	23,5	—	—	23,5	—	—	—	405,2	289,7
Bois de chauffage											
Utilisation totale . . .	841,4	—	41,6	—	—	41,6	—	—	—	54,0	745,8
» effective . .	171,6	—	0,8	—	—	0,8	—	—	—	21,6	149,2
Déchets de scierie											
Utilisation totale . . .	355,2	—	—	—	—	—	—	—	—	355,2	—
» effective . .	142,1	—	—	—	—	—	—	—	—	142,1	—
Bagasse											
Utilisation totale . . .	106,8	—	—	—	—	—	—	—	—	106,8	—
» effective . .	42,7	—	—	—	—	—	—	—	—	42,7	—
Autres combustibles végétaux											
Utilisation totale . . .	1 741,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1 741,8
» effective . .	348,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	348,4
Total des combustibles végétaux											
Utilisation totale . . .	3 045,2	—	41,6	—	—	41,6	—	—	—	516,0	2 487,6
» effective . .	704,8	—	0,8	—	—	0,8	—	—	—	206,4	497,6
Total de l'énergie non animale											
Utilisation totale . . .	18 270,1	217,2	4 237,9	42,0	1 859,7	1 399,7	67,3	196,0	673,2	7 283,8	6 531,2
» effective . .	7 943,8	45,7	689,5	8,4	376,4	106,4	16,8	41,2	140,3	4 580,4	2 628,2
Travail des animaux de trait											
Utilisation totale . . .	85,6	85,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
» effective . .	85,6	85,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Travail humain											
Utilisation totale . . .	119,0	70,0	—	—	—	—	—	—	—	10,0	39,0
» effective . .	119,0	70,0	—	—	—	—	—	—	—	10,0	39,0
Total de l'énergie animale											
Utilisation totale . . .	204,6	155,6	—	—	—	—	—	—	—	10,0	39,0
» effective . .	204,6	155,6	—	—	—	—	—	—	—	10,0	39,0
ÉNERGIE TOTALE											
Utilisation totale . . .	18 474,7	372,8	4 237,9	42,0	1 859,7	1 399,7	67,3	196,0	673,2	7 293,8	6 570,2
Chaleur	13 120,1	—	—	—	—	—	—	—	—	6 878,6	6 241,5
Énergie	5 354,6	372,8	4 237,9	42,0	1 859,7	1 399,7	67,3	196,0	673,2	415,2	328,7
Utilisation effective . .	7 892,4[b]	201,3	689,5	8,4	376,4	106,4	16,8	41,2	140,3	4 334,4 [b]	2 667,2
Chaleur	6 123,7[b]	—	—	—	—	—	—	—	—	3 785,2 [b]	2 338,5
Énergie	1 768,7[b]	201,3	689,5	8,4	376,4	106,4	16,8	41,2	140,3	549,2 [b]	328,7

[a] Non compris l'Europe orientale et la Chine continentale. Pour l'estimation approximative de l'énergie utilisée dans cette zone, voir l'annexe.

[b] Chiffre ajusté de façon à comprendre les 134 millions de mégawattheures d'énergie thermoélectrique produite et consommée dans l'industrie et à exclure la quantité de chaleur utile perdue au cours de cette opération (évaluée à l'équivalent de 400 millions de mégawattheures).

peut déduire, quant à l'utilisation des combustibles et de l'énergie, de données éparses concernant les transports, la production industrielle et l'agriculture de ces pays, d'un point de vue absolu ou par rapport au reste du monde. Les données relatives à la production, qui ont servi de base à ces calculs et dont un certain nombre résultent d'évaluations, sont indiquées au tableau D.

Tableau D

Production de combustibles et d'énergie dans les pays d'Europe orientale, en U.R.S.S. et en Chine continentale

	(10^6 MWh)
Charbon	3 160
Lignite et tourbe	950
Pétrole brut et essence ordinaire	700
Gaz naturel et gaz des mines	150
Houille blanche	20
Combustibles non commerciaux	1 550
Source d'énergie animale	90
TOTAL	6 620

Pour calculer l'*approvisionnement* en combustibles et en énergie de l'ensemble de ces pays, on a déduit du montant de la production celui des exportations nettes, soit 7,6 millions de tonnes de charbon (équivalent en électricité : 61 millions de mégawattheures). Si l'on laisse de côté l'énergie animale, les exportations et certaines pertes, on peut estimer que la situation des approvisionnements en combustibles et en énergie dans chacun de ces pays a été la suivante :

	Total 10^6 MWh	*Moyenne par habitant* (MWh)
Allemagne orientale	420	23
Bulgarie	30	4
Hongrie	110	11
Pologne	450	18
Roumanie	80	5
Tchécoslovaquie	370	29
U.R.S.S.	3 500	16
Chine continentale	1 400	3
TOTAL	6 360	9

L'énergie perdue ou consacrée à des utilisations non thermiques au cours du traitement des combustibles a été calculée d'après le rapport normal consommation-production. On a évalué la production de pétrole brut à 57 millions de tonnes, celle du coke à 50 millions et celle d'énergie thermoélectrique à 160 millions de mégawattheures. On a estimé que les approvisionnements et l'utilisation effective dans les différents secteurs de l'économie ont été les suivants (en 10^6 MWh) :

	Approvisionnements	*Utilisation effective*	*Pertes*
Agriculture	90	70	20
Transports	940	65	875
Industrie	2 840	1 518	1 322
Besoins ménagers	1 816	600	1 216
Pertes au cours de traitement, etc.	873	—	873
TOTAL	6 559	2 253	4 306

Par comparaison avec les chiffres relatifs aux autres régions, ces données semblent satisfaisantes, bien qu'elles puissent s'écarter sensiblement de la réalité. Il faudrait d'ailleurs qu'elles s'en écartent très fortement pour entraîner une modification sérieuse des totaux mondiaux donnés dans les tableaux, puisque 20 à 25 pour cent seulement de l'énergie mondiale sont consommés dans les pays en question.

C. Sources et méthodes utilisées pour le chapitre II

Le tableau E retrace l'évolution historique de la production des sources commerciales d'énergie. Les données relatives au charbon, au lignite et au pétrole ont été extraites, dans une large mesure, de la publication intitulée *Energiequellen der Welt* et de l'*Annuaire statistique des Nations Unies*. On a procédé à des évaluations en ce qui concerne les chiffres relatifs à la production de l'U.R.S.S. et de la Chine pendant les années pour lesquelles les sources citées ne donnent aucun renseignement. Les données relatives à la production de gaz naturel, d'essence ordinaire et d'énergie hydraulique sont en partie le résultat d'évaluations. Pour la période 1860-1952, elles ont été calculées surtout d'après la production (ou la capacité de production) connue des États-Unis d'Amérique et compte tenu de la place de la production des États-Unis d'Amérique dans la production mondiale à la fin de l'époque considérée. Les chiffres relatifs aux années ultérieures ont été établis d'après des renseignements portant sur la production de la plupart des pays producteurs. On estime que les erreurs que l'on a pu commettre dans le calcul de ces chiffres sont faibles et que leur influence sur le montant total de l'énergie est négligeable.

On constatera qu'il existe des différences entre certains totaux de 1952, qui figurent dans les tableaux F, C et E, et les tableaux insérés dans le texte. En ce qui concerne les tableaux F et E, on a calculé la valeur du pétrole (ou des combustibles liquides) en tant que source d'énergie, d'après celle des produits combustibles qui en sont tirés plutôt que celle du pétrole brut, afin d'exclure la fraction du pétrole brut qui est transformée en produits non combustibles. Cependant, dans le tableau 2 et dans le graphique, la valeur énergétique de la production de pétrole (ou d'essence ordinaire) représente la valeur potentielle totale de cette source d'énergie; dans chaque cas, on a tenu compte de la perte d'énergie résultant de l'utilisation non thermique de la source en question.

Les données qui figurent au tableau F laissent de côté non seulement les produits non combustibles fabriqués à partir du pétrole, mais aussi les combustibles de soute et l'énergie animale. Leur total ne serait donc pas équivalent aux totaux donnés en d'autres endroits.

L'indice de la production industrielle mondiale utilisée au chapitre II a été calculé à partir de trois indices distincts. Les indices de base utilisés ont été les suivants :

1. L'indice de la production industrielle mondiale, 1929-1952, établi par les Nations Unies [7].

2. L'indice de Hilgerdt de la production manufacturière mondiale, 1870-1932 [8].

Tableau E

Production mondiale de sources commerciales d'énergie

	VOLUME						ÉQUIVALENCE ÉLECTRIQUE*							
	Charbon	Lignite	Pétrole	Essence ordinaire	Gaz naturel	Énergie hydraulique	Charbon	Lignite	Pétrole	Essence ordinaire	Gaz naturel	Énergie hydraulique	Total	
	(En millions de tonnes)				(En milliards de m³)	(En milliards de kWh)	(En millions de mégawattheures)							
1860	132,1	6,1	0,1	—	—	6	1 057	15	1	—	—	6	1 079	1860
61	139,5	6,6	0,3	—	—	6	1 116	16	3	—	—	6	1 141	61
62	138,7	7,3	0,4	—	—	6	1 110	18	4	—	—	6	1 138	62
63	149,4	7,7	0,4	—	—	6	1 195	19	4	—	—	6	1 224	63
64	162,3	8,6	0,3	—	—	7	1 298	22	3	—	—	7	1 330	64
65	171,7	9,3	0,4	—	—	7	1 374	23	4	—	—	7	1 408	65
66	181,4	9,4	0,5	—	—	7	1 451	24	6	—	—	7	1 488	66
67	194,4	10,1	0,5	—	—	7	1 555	25	5	—	—	7	1 592	67
68	192,4	10,7	0,5	—	—	8	1 539	27	6	—	—	8	1 580	68
69	199,3	11,6	0,6	—	—	8	1 594	29	7	—	—	8	1 638	69
1870	203,5	12,2	0,8	—	—	8	1 628	30	8	—	—	8	1 674	1870
71	227,1	14,2	0,8	—	—	8	1 817	36	8	—	—	8	1 869	71
72	246,6	15,5	0,9	—	—	9	1 973	39	10	—	—	9	2 031	72
73	263,3	17,4	1,5	—	—	9	2 106	44	15	—	—	9	2 174	73
74	255,8	19,2	1,6	—	—	9	2 046	48	17	—	—	9	2 120	74
75	263,8	19,0	1,4	—	—	9	2 110	48	14	—	—	9	2 181	75
76	266,8	19,9	1,5	—	—	10	2 134	50	16	—	—	10	2 210	76
77	272,5	19,7	2,2	—	—	10	2 180	49	22	—	—	10	2 261	77
78	272,6	20,5	2,5	—	—	10	2 181	51	26	—	—	10	2 268	78
79	287,3	21,7	3,2	—	—	10	2 298	54	34	—	—	10	2 396	79
1880	313,9	23,1	4,1	—	—	11	2 511	58	43	—	—	11	2 623	1880
81	337,7	24,5	4,4	—	0,3	11	2 702	61	46	—	3	11	2 823	81
82	362,6	25,7	4,9	—	0,6	11	2 901	64	51	—	6	11	3 033	82
83	387,9	27,4	4,1	—	0,8	11	3 103	68	43	—	9	11	3 234	83
84	389,5	28,1	4,9	—	1,1	12	3 116	70	51	—	12	12	3 261	84
85	380,6	29,0	5,0	—	1,5	12	3 045	72	52	—	16	12	3 197	85
86	381,6	29,8	6,5	—	1,9	12	3 053	74	67	—	20	12	3 226	86
87	408,1	31,1	6,5	—	2,4	12	3 265	78	68	—	25	12	3 448	87
88	441,2	33,2	7,1	—	2,8	13	3 530	83	74	—	30	13	3 730	88
89	448,0	35,4	8,4	—	3,3	13	3 584	88	88	—	35	13	3 808	89
1890	474,6	38,9	10,5	—	3,8	13	3 797	97	109	—	40	13	4 056	1890
91	493,8	41,6	12,5	—	3,9	13	3 950	104	130	—	41	13	4 238	91
92	498,5	42,2	12,2	—	4,1	14	3 988	106	126	—	43	14	4 277	92
93	487,1	43,9	12,6	—	4,2	14	3 897	110	131	—	45	14	4 197	93
94	509,3	45,2	12,2	—	4,3	14	4 074	113	127	—	46	14	4 374	94
95	536,3	49,2	14,2	—	4,5	15	4 290	123	148	—	48	15	4 624	95
96	551,8	52,2	15,7	—	5,1	15	4 414	130	163	—	54	15	4 776	96
97	577,2	56,6	16,7	—	5,7	15	4 618	142	174	—	60	15	5 009	97
98	608,2	60,2	17,2	—	6,2	16	4 866	150	179	—	66	16	5 277	98
99	667,0	63,9	18,0	—	6,7	16	5 336	160	187	—	71	16	5 770	99
1900	700,7	71,5	20,5	—	7,1	16	5 606	179	213	—	75	16	6 089	1900
01	717,5	76,8	23,0	—	7,9	18	5 740	192	239	—	84	18	6 273	01
02	733,8	75,3	24,9	—	8,4	20	5 870	188	259	—	89	20	6 426	02
03	807,4	78,4	26,7	—	8,9	21	6 459	196	278	—	94	21	7 048	03
04	812,4	81,5	29,9	—	9,3	23	6 499	204	311	—	99	23	7 136	04

Tableau E *(fin)*

	VOLUME						ÉQUIVALENCE ÉLECTRIQUE[a]							
	Charbon	Lignite	Pétrole	Essence ordinaire	Gaz naturel	Énergie hydraulique	Charbon	Lignite	Pétrole	Essence ordinaire	Gaz naturel	Énergie hydraulique	Total	
	(En millions de tonnes)				(En milliards de m³)	(En milliards de kWh)	(En millions de mégawattheures)							
1905	857,5	87,0	29,5	—	10,6	25	6 860	218	307	—	112	25	7 522	1905
06	925,9	93,3	29,2	—	11,7	27	7 407	233	304	—	124	27	8 095	06
07	1 022,7	102,0	36,2	—	12,2	28	8 182	255	376	—	129	28	8 970	07
08	968,1	105,6	39,1	—	12,1	30	7 750	264	407	—	128	30	8 579	08
09	1 010,4	107,5	40,9	—	14,4	32	8 083	269	426	—	153	32	8 963	09
1910	1 056,6	108,4	44,9	—	15,3	34	8 453	271	467	—	162	34	9 387	1910
11	1 076,8	112,6	47,2	—	15,4	37	8 614	282	491	—	163	37	9 587	11
12	1 133,8	124,4	48,3	—	16,9	40	9 070	311	502	—	179	40	10 102	12
13	1 216,3	128,8	53,7	0,1	17,5	43	9 730	322	559	1	185	43	10 840	13
14	1 086,1	120,9	55,9	0,2	17,7	46	8 689	302	582	2	188	46	9 809	14
15	1 069,5	123,7	59,1	0,2	18,9	49	8 556	309	615	2	200	49	9 731	15
16	1 152,1	131,9	62,5	0,3	22,6	52	9 217	330	650	4	240	52	10 493	16
17	1 215,3	134,9	69,2	0,7	23,9	55	9 722	337	720	8	253	55	11 095	17
18	1 194,9	141,4	69,5	0,8	21,6	58	9 559	354	723	10	229	58	10 933	18
19	1 040,0	133,1	77,5	1,0	22,4	61	8 320	333	806	12	237	61	9 769	19
1920	1 192,5	157,5	99,2	1,2	24,0	64	9 540	394	1 032	14	254	64	11 298	1920
21	993,2	168,4	107,4	1,3	19,9	70	7 946	421	1 117	16	211	70	9 781	21
22	1 061,8	182,7	119,9	1,5	22,9	76	8 494	457	1 247	18	243	76	10 535	22
23	1 205,5	163,4	141,5	2,4	30,2	81	9 644	408	1 471	29	320	81	11 953	23
24	1 189,0	173,1	141,3	2,7	34,2	85	9 512	433	1 469	33	363	85	11 895	24
25	1 185,1	186,9	148,8	3,3	36,1	89	9 481	467	1 548	40	383	89	12 008	25
26	1 177,1	187,7	152,8	4,0	39,7	92	9 417	469	1 589	48	421	92	12 036	26
27	1 275,2	202,9	175,2	4,7	43,6	101	10 202	507	1 822	56	462	101	13 150	27
28	1 246,1	219,4	184,2	5,3	47,5	110	9 969	548	1 915	64	503	110	13 109	28
29	1 325,1	232,4	206,6	6,6	57,9	119	10 601	581	2 149	79	614	119	14 143	29
1930	1 216,9	197,2	196,6	6,5	54,2	128	9 735	493	2 045	78	575	128	13 053	1930
31	1 074,5	181,6	189,5	5,4	52,6	134	8 596	454	1 971	65	558	134	11 778	31
32	955,2	170,2	180,7	4,5	49,1	140	7 642	426	1 880	54	520	140	10 662	32
33	1 000,0	174,4	197,2	4,2	49,4	146	8 000	436	2 051	50	524	146	11 207	33
34	1 088,0	191,3	208,2	4,5	56,2	153	8 704	478	2 165	54	596	153	12 150	34
35	1 111,5	205,8	226,6	4,8	57,5	160	8 892	516	2 356	58	610	160	12 591	35
36	1 250,0	205,2	245,0	5,2	66,6	167	10 000	513	2 548	63	706	167	13 997	36
37	1 302,0	252,0	280,0	6,0	74,0	172	10 416	630	2 912	72	784	172	14 986	37
38	1 214,0	264,0	273,0	6,3	70,6	179	9 712	660	2 839	76	748	179	14 214	38
39	1 288,0	292,0	285,6	6,4	75,9	186	10 304	730	2 970	77	805	186	15 072	39
1940	1 363,0	319,2	292,0	6,9	81,8	193	10 904	798	7 037	83	867	193	15 882	1940
41	1 422,0	331,2	279,0	7,9	86,6	199	11 376	828	2 902	95	918	199	16 318	41
42	1 429,0	334,0	263,0	8,0	94,2	210	11 432	835	2 735	96	998	210	16 306	42
43	1 430,0	348,0	288,0	8,2	105,2	221	11 440	870	2 995	97	1 115	221	16 739	43
44	1 379,0	316,0	324,0	8,9	114,2	232	11 032	790	3 370	107	1 210	232	16 741	44
45	1 188,0	187,2	342,0	9,7	125,0	243	9 504	468	3 557	116	1 325	243	15 213	45
46	1 216,0	256,0	376,0	10,2	129,3	256	9 728	640	3 910	122	1 371	256	16 027	46
47	1 374,0	274,0	414,0	10,7	143,2	269	10 992	685	4 306	129	1 518	269	17 899	47
48	1 429,0	299,2	468,0	11,7	161,2	281	11 432	748	4 867	140	1 709	281	19 177	48
49	1 342,0	332,0	466,0	12,2	170,3	295	10 736	830	4 846	147	1 805	295	18 659	49
1950	1 454,0	360,8	523,0	13,6	197,0	332	11 632	902	5 439	163	2 088	332	20 556	1950
51	1 524,0	396,8	592,0	14,6	233,2	363	12 192	992	6 157	175	2 472	363	22 351	51
52	1 499,0	423,2	623,0	15,0	250,8	395	11 992	1 058	6 479	180	2 658	395	22 762	52
53	1 500,0	450,0	658,0	15,7	263,3	425	12 000	1 125	6 843	188	2 791	425	23 372	53

[a] Les combustibles comptent pour leur valeur énergétique potentielle totale, sauf dans le cas du pétrole où les valeurs représentent seulement celles des produits combustibles. En ce qui concerne les sources, etc., voir page 26.

Tableau F

Volume brut apparent de la consommation intérieure des sources commerciales et non commerciales d'énergie en 1952

(10^6 MWh, calculés d'après la valeur calorifique totale)

Pays	Combustibles solides [a]	Combustibles liquides [b]	Gaz naturel [c]	Énergie hydro-électrique [d]	Total des sources commerciales	Sources non commerciales [e]	Total général	Consommation par habitant (MWh)
Afrique : Total	265,1	112,1	0,1	1,7	379,0	386,9	765,9	3,7
Afrique-Équatoriale française	0,1	1,0	—	—	1,1	8,7	9,8	2,2
Afrique du Nord espagnole	0,2*	0,6*	—	.	0,9	2,5	3,4	2,9
Afrique-Occidentale française	1,3	3,0	—	.	4,3	33,8	38,1	2,2
Algérie	5,2	7,1	0,1	0,3	12,7	15,4	28,1	3,1
Angola	0,3	0,6	—	.	0,9	9,7	10,6	2,6
Cameroun sous administration française	0,2	0,8	—	—	1,0	6,6	7,6	2,4
Canaries (îles)	0,2	1,3	—	.	1,6	—	1,6	1,9
Cap-Vert (îles du)	0,1	0,7	—	—	0,8	—	0,8	5,0
Congo belge	4,0	2,5	—	0,7	7,2	28,4	35,6	3,0
Côte-de-l'Or	1,0	2,4	—	—	3,4	8,6	12,0	3,0
Égypte	1,6	36,3	...	.	37,8	32,5	70,4	3,4
Éthiopie	.	0,3	—	.	0,4	30,0	30,4	2,0
Gambie	—	0,1	—	—	0,1	0,5	0,6	2,0
Guinée portugaise	—	0,3*	—	—	0,3	1,0	1,3	2,4
Kenya	0,2	6,1	—	0,1	6,4	11,4	17,7	3,1
Libéria	—	0,2	—	.	0,2	3,3	3,5	2,1
Libye	.	0,6	—	—	0,6	2,1	2,7	2,4
Madagascar	0,4	0,9	—	.	1,3	8,6	9,9	2,3
Maroc (français)	2,8	8,4	—	0,2	11,4	15,3	26,7	3,3
Maurice (île)	0,2	0,4	—	.	0,6	3,2	3,7	7,1
Mozambique	3,0	0,8	—	—	3,8	13,1	16,9	2,9
Nyassaland	0,2	0,2	—	.	0,5	11,4	11,9	4,8
Nigeria	4,8	3,1	—	0,1	8,0	47,3	55,4	1,9
Ouganda	—	0,9	—	—	0,9	20,8	21,7	4,1
Réunion	0,1*	0,2	—	—	0,3	1,1	1,4	5,3
Rhodésie du Nord	6,2	0,7	—	0,2*	7,1	3,7	10,8	5,4
Rhodésie du Sud	12,3	2,0	—	—	14,2	5,9	20,2	9,0
Ruanda-Urundi	.	0,2	—	.	0,2	7,7	7,9	2,0
Saint-Thomas et Prince (îles)	—	.	—	—	.	0,1	0,1	2,2
Seychelles	—	.	—	—	.	0,1	0,1	2,2
Sierra-Leone	0,2	0,3	—	—	0,5	5,1	5,6	2,9
Somalie britannique	—	0,1	—	—	0,1	1,0	1,1	2,1
Somalie française	0,1	0,1	—	—	0,2	0,1	0,3	5,6
Somalie sous administration italienne	—	0,1	—	—	0,1	2,4	2,6	2,0
Soudan	0,4	2,4	—	—	2,8	16,2	19,0	2,2
Tanganyika	0,6	1,3	—	.	2,0	15,1	17,0	2,1
Togo sous administration britannique	—	0,1	—	—	0,1	0,8	0,9	2,2
Togo sous administration française	.	0,2	—	—	0,2	1,9	2,1	2,1
Tunisie	1,5	4,0	—	—	5,4	6,3	11,7	3,3
Union Sud-Africaine	217,8	22,1	—	.	239,9	4,7	244,7	17,0
Zanzibar		0,1	—	—	0,1	0,5	0,6	2,2
Amérique du Nord : Total	3 562,2	3 824,3	2 516,6	172,3	10 075,3	364,8	10 440,0	60,8
Alaska	3,6	4,2	—	0,1*	7,8	0,3	8,2	56,2
Canada et Terre-Neuve	286,4	221,8	34,1	60,2*	602,5	75,4	678,0	47,0
États-Unis	3 272,0	3 598,2	2 482,4	112,0	9 464,6	289,0	9 753,6	62,1
Groenland	0,1	0,1	—	.	0,2	—	0,2	9,0
Saint-Pierre-et-Miquelon	0,1	.	—	—	0,1	—	0,1	22,4

Tableau F *(suite)*

Pays	Combustibles solides [a]	Combustibles liquides [b]	Gaz naturel [c]	Énergie hydro-électrique [d]	Total des sources commerciales	Sources non commerciales	Total général	Consommation par habitant (MWh)
Amérique centrale : Total	12,0	194,6	27,0	3,9	237,5	128,2	365,7	6,9
Antilles néerlandaises	—	40,8	—	—	40,8	—	40,8	231,6
Bahamas (îles)	—	0,3	—	—	0,3	0,1	0,3	4,2
Bardades	.	0,3	.	—	0,4	1,2	1,5	7,0
Bermudes	.	0,4	—	—	0,4	—	0,4	10,7
Costa Rica	—	1,3	—	0,2	1,5	1,6	3,1	3,6
Cuba	0,7	26,1	—	.	26,8	38,5	65,3	11,8
Guadeloupe	.	0,2	—	—	0,2	0,9	1,1	4,0
Guatemala	—	2,6	—	0,1	2,6	5,5	8,1	2,8
Haïti	—	0,6	—	—	0,6	5,7	6,3	2,0
Honduras	—	1,8	—	.	1,8	2,6	4,4	2,9
Honduras britannique	—	0,1	—	—	0,1	0,2	0,3	3,6
Iles Vierges	.	0,2	—	—	0,2	—	0,2	6,7
Jamaïque	0,1	1,9	—	.	2,0	4,0	6,0	4,1
Martinique	.	0,3	—	—	0,4	0,6	1,0	3,6
Mexique	11,0	99,1	21,9	2,9	134,9	38,0	173,0	6,4
Nicaragua	—	0,8	—	.	0,8	2,4	3,2	2,9
Panama	—	2,3	—	—	2,3	1,2	3,5	4,1
Porto Rico	0,1	9,2	—	0,3	9,6	11,2	20,8	9,4
République Dominicaine	.	1,8	—	—	1,8	7,1	8,9	4,0
Salvador	—	1,3	—	0,1	1,4	6,0	7,4	3,7
Trinité et Tobago	—	2,5	5,1	—	7,6	1,7	9,2	13,9
Zone du Canal de Panama	—	0,7	—	0,2	1,0	—	1,0	22,9
Amérique du Sud : Total	72,2	273,0	28,1	13,1	386,4	318,4	704,8	6,1
Argentine	15,1	106,7	8,5	0,2*	130,5	33,7	164,2	9,1
Bolivie	.	2,0	...	0,2	2,2	7,9	10,1	3,3
Brésil	23,3	70,5	—	8,7	102,5	205,7	308,1	5,7
Chili	20,6	13,2	—	1,8	35,7	10,1	45,8	7,7
Colombie	10,4	14,1	1,0*	0,8	26,4	22,6	48,9	4,3
Équateur	—	3,0	—	0,1	3,0	5,8	8,8	2,6
Guyane britannique	.	1,3	—	—	1,4	2,0	3,3	7,5
Guyane française	—	0,1	—	—	0,1	0,1	0,1	4,6
Paraguay	—	0,4	—	.	0,4	2,6	3,0	2,1
Pérou	1,4	15,6	...	0,6	17,6	17,5	35,1	4,0
Surinam	.	1,0	—	—	1,1	0,4	1,5	6,6
Uruguay	1,0	11,8	—	0,5	13,2	2,9	16,2	6,8
Venezuela	0,2	33,4	18,6	0,2	52,4	7,2	59,6	11,3
Asie : Total [f]	745,4	251,9	14,0	46,1	1 057,3	1 457,2	2 514,6	3,1
Aden	0,3	0,6	—	—	0,9	1,4	2,3	2,6
Afghanistan	0,1	0,2*	—	.	0,3	23,9	24,2	2,0
Arabie saoudite	—	9,3*	—	—	9,3	11,9	21,2	3,5
Bahrein	—	8,5	...	—	8,5	—	8,5	75,9
Birmanie	1,6	2,1	—	—	3,7	36,2	39,9	2,1
Bornéo du Nord	—	0,2	—	—	0,2	0,7	0,9	2,8
Brunéi	—	0,1*	0,5*	—	0,7	0,1	0,8	16,0
Ceylan	2,7	3,8	—	0,1	6,6	13,7	20,4	2,6
Chine (Formose)	18,2	1,2*	0,3	1,2	20,9	15,9	36,9	4,7
Chypre	.	1,2	—	—	1,2	0,7	1,9	3,8
Corée du Sud	9,3	1,5*	—	0,2	11,1	38,4	49,4	2,4
Hong-Kong	2,5	3,6	—	—	6,1	2,3	8,4	4,2
Inde	267,1	38,1	—	3,0	308,2	669,0	977,2	2,7
Indochine	4,2	3,0	—	.	7,2	54,5	61,7	2,0
Indonésie	7,3	25,0	11,3*	0,4	44,1	144,5	188,6	2,4
Irak	—	8,3	...	—	8,3	8,8	17,0	2,3
Iran	1,4	14,3	...	—	15,7	34,3	50,0	2,6
Israël	0,2*	10,5	—	—	10,6	0,7	11,3	7,0

Tableau F *(fin)*

Pays	Combustibles solides [a]	Combustibles liquides [b]	Gaz naturel [c]	Énergie hydro-électrique [d]	Total des sources commerciales	Sources non commerciales [e]	Total général	Consommation par habitant (MWh)
Asie (suite)								
Japon	370,5	49,6	1,0	40,3	461,4	111,6	572,9	6,7
Jordanie	—	0,7	—	—	0,7	1,0	1,8	1,3
Koweit	—	1,6	...	—	1,6	—	1,6	10,7
Malaisie et Singapour	3,0	16,3	—	0,3	19,6	9,2	28,7	4,4
Pakistan	15,7	13,6	0,3	0,2	29,8	150,5	180,4	2,4
Philippines	1,1	14,7	—	0,3	16,1	41,7	57,8	2,8
Sarawak	—	2,6	0,5	—	3,1	1,1	4,2	7,2
Syrie et Liban	.	8,1	—	—	8,1	8,3	16,3	3,5
Thaïlande	0,2	4,1	—	—	4,3	39,6	43,9	2,3
Turquie	40,0	9,0	—	0,1	49,1	37,5	86,6	3,9
Europe : Total [g]	4 262,0	671,9	22,7	136,4	5 093,0	395,4	5 488,4	18,1
Allemagne occidentale	1 109,3	53,6	2,1	11,0	1 175,9	51,2	1 227,1	25,3
Autriche	59,1	9,9	2,1*	5,4	76,5	11,3	87,8	12,7
Danemark	49,9	19,8	—	0,2	70,0	8,3	78,2	17,9
Espagne	107,0	16,6	—	7,8	131,4	37,7	169,0	6,1
Finlande	20,6	7,3	—	4,1	32,0	44,4	76,4	18,7
France et Sarre	621,6	122,4	2,9	22,5	769,4	48,2	817,6	18,8
Grèce	3,0	13,8	—	.	16,8	13,2	30,1	3,9
Irlande	15,5	8,0	—	0,5*	24,0	17,1	41,1	13,9
Islande	0,5	1,7	—	0,2	2,4	0,8	3,2	21,4
Italie	84,3	67,8	15,2	28,9	196,2	61,1	257,3	5,5
Malte	0,2	0,9	—	—	1,1	—	1,1	3,5
Norvège	14,5	19,9	—	18,7	53,1	11,2	64,3	19,3
Pays-Bas	135,1	35,1	0,2	0,2	170,6	4,4	175,0	16,9
Portugal	7,2	9,0	—	1,2	17,4	16,0	35,5	3,9
Royaume-Uni	1 669,7	179,5	—	1,7	1 850,9	5,7	1 856,5	36,6
Suède	60,8	57,6	—	20,6	138,9	31,4	170,3	23,9
Suisse	21,8	14,4	—	11,9	48,2	5,6	53,8	11,1
Union belgo-luxembourgeoise	242,0	30,2	—	0,2	272,3	1,8	274,1	30,4
Yougoslavie	40,1	4,4	0,1	1,4	46,1	26,0	72,1	4,3
Océanie : Total	180,2	88,8	—	5,1	274,2	39,4	313,5	24,4
Australie, 1951/52	166,5	60,7	—	1,6	228,8	26,9	255,7	29,6
Fidji (îles)	0,2*	0,4	—	—	0,6	1,2	1,8	5,7
Hawaii	—	12,9*	—	—	12,9	4,9	17,8	34,9
Nouvelle-Calédonie	1,4	0,2	—	0,1*	1,7	0,1	1,8	27,2
Nouvelle-Guinée (Australie)	.	0,2	—	—	0,2	2,0	2,2	2,0
Nouvelles-Hébrides	—	0,1	—	—	0,1	0,1	0,2	3,0
Nouvelle-Zélande	12,1	14,3	—	3,4*	29,7	3,9	33,7	16,9
Possessions françaises du Pacifique	.	0,1	—	—	0,2	0,1	0,3	4,0
Salomon britanniques (îles)	—	.	—	—	.	0,2	0,2	1,9

— Néant
. Moins de 0,06
... Renseignement non disponible
* Estimation

[a] Charbon et lignite produits et consommés, plus les importations nettes d'agglomérés et de coke.
[b] Essence, pétrole lampant, fuel-oil et gaz de pétrole liquéfiés.
[c] Gaz naturel et gaz de raffinerie, plus le montant net des importations de gaz manufacturé.
[d] Y compris le montant net des importations d'énergie électrique.
[e] Bois de chauffage, bois pour la fabrication de charbon de bois, déchets de scieries, bagasse et autres combustibles végétaux.
[f] Non compris la Chine continentale, la Corée du Nord et l'U.R.S.S.
[g] Non compris les pays de l'Europe orientale et l'U.R.S.S.

3. Un nouvel indice de la production minérale mondiale pour la période 1870-1937, établi à partir des données historiques concernant la production mondiale de 18 minéraux (représentant 90 pour cent de l'ensemble de la production minière) et en fonction du prix sur le carreau * aux États-Unis d'Amérique en 1950.

Pour calculer un indice unique à partir de ces trois indices, on a commencé par combiner l'indice de la production minière et celui de la production manufacturière pour 1870-1957, d'après la place tenue par la production minière mondiale et la production manufacturière mondiale dans la production industrielle totale à la fin de la période, c'est-à-dire respectivement 13 pour cent et 87 pour cent. L'indice de la production industrielle ainsi obtenu a été à son tour combiné (à la date de 1929) avec l'indice de la production industrielle mondiale (1929-1952), établi par l'Organisation des Nations Unies.

Il faut reconnaître que les données et les méthodes utilisées dans le calcul de cet indice de la production industrielle laissent beaucoup à désirer du point de vue de la précision, mais, si l'on considère les autres éléments d'information dont on dispose, on peut dire que cet indice donne une idée assez exacte de l'ordre de grandeur des données considérées.

* Ou de la valeur. On a utilisé le *Minerals Yearbook* des États-Unis d'Amérique, mais en faisant les corrections nécessaires pour trouver l'équivalent en minerai plutôt qu'en métal.

BIBLIOGRAPHIE

Références

1. Dewhurst J. Frederic, *America's needs and resources, a new survey*, Twentieth Century Fund, 1955, New York.
2. Barger Harold, *The transportation industries, 1889-1946*, National Bureau of Economic Research, 1951, New York.
3. FAO, *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture*, 1954.
4. Barnett Harold J., *Energy uses and supplies, 1939, 1947, 1965*, United States Bureau of Mines, octobre 1950, Information Circular 7582, Washington.
5. Marchal G. H., *Le bilan énergétique de la Belgique 1951-1952*, Annales des mines de Belgique, 1954, vol. 3, nº 1, Bruxelles.
6. Commission économique pour l'Europe, *Tendances de la consommation du charbon dans les zones occidentales d'Allemagne*, 1953, Genève.
7. Organisation des Nations Unies, *Annuaire statistique, 1952* et *Bulletin mensuel de statistique, avril 1953.*
8. Hilgerdt Folke, *Industrialisation et commerce extérieur*, Société des Nations, 1945, Genève.

Publications de caractère général

Ailleret Pierre, *La civilisation et l'utilisation de l'énergie*, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, septembre 1950, Paris.

Bronowski J., *L'énergie au service de l'homme*, Bureau of Current Affairs, Londres, en collaboration avec l'UNESCO, 1951, Londres,

Brown Harrison, *The challenge of man's future*, The Viking Press, 1954, New York.

Canadian Bank of Commerce, *Energy and economic development*, Commercial letter, novembre 1953, Toronto.

Egerton Sir A. C., *La civilisation et l'utilisation de l'énergie*, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, février 1951, Paris.

Eichelberg Gustav, *L'utilisation de l'énergie*, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, août 1950, Paris.

Guyol Nathaniel B., *Population et ressources en énergie*, Compte rendu des travaux du Congrès mondial de la population, 1954, vol. VI (à paraître), Nations Unies, New York. — *Energy resources of the world*, Department of State des États-Unis d'Amérique, 1949, Washington.

Hartley Sir Harold, *Limiting in world development : What is possible?* Annual Proceedings of the Associated Scientific and Technical Societies of South Africa, 1947-1948. Johannesburg, 1949.

Kent William, *Kent's mechanical engineers' handbook*. Power, 1936, 11e édition, John Wiley and Sons, Inc., New York.

Marks Lionel S., *Mechanical engineers' handbook*, 1941, 4e édition, McGraw Hill Book Co., New York et Londres.

Mather Kirtley F., *Les aspects sociaux de la science*, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, 1950, Paris.

McCabe Louis C., *Les sources et la consommation d'énergie dans le monde*, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, juin 1951, Paris.

Olson Ernest C., *Factors affecting international differences in production*, American Economic Review, mai 1948.

Parker A., *World energy resources and their utilization*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 160, nº 4.

Prévôt Jean, *Les variations concomitantes de l'énergie consommée et du produit national*, Journal de la Société de Statistique de Paris, janvier-mars 1951.

Putnam Palmer Cosslett, *Energy in the future*, Nostrand Press, 1953, New York.

Read Thomas T., *The world's output of work*, American Economic Review, mars 1933.

Schurr Sam H. et Marschak Jacob, *Economic aspects of atomic power*, Princeton University Press, 1950, Princeton.

Simon Sir Francis E., *L'avenir de l'énergie*, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, février 1951, Paris.

Thacker M. S., *Rôle de l'énergie dans les régions insuffisamment développées*, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, mai 1951, Paris.

Tiraspolsky W., *L'énergie, clé de l'évolution sociale*, Impact, vol. III, nº 1, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, Paris.

Tryon F. C., *An index of consumption of fuel and water power*, Journal of the American Statistical Association, septembre 1927.

Zagaroff S. O., *National income and general productivity in terms of energy*. Schweizerische Zeitschrift für Volkswirtschaft und Statistik, mars 1955, Bâle.

Zimmerman Erich W., *World resources and industries*, 1951, Nouvelle édition, Harper & Brothers, New York.

(Anonyme), *Les transports dans le monde*, Études et Conjonctures, 1951, nº 5, Presses Universitaires de France, Paris.

Périodiques techniques et commerciaux

Braunkohle, Wärme und Energie, Verlag die Braunkohle, Düsseldorf (mensuel).

Énergie, Association des centrales électriques industrielles de Belgique, Bruxelles (bi-mensuel).

Erdöl und Kohle, Deutsche Gesellschaft für Mineralölwissenschaft und Kohlenchemie, Hambourg (mensuel).

Glückauf, Bergmannische Zeitschrift, Verlag Glückauf, G. m. b. H., Essen (bi-hebdomadaire).

La revue pétrolière, Paris (mensuel).

Oil and gas journal, The Petroleum Publication Co., Tulsa (hebdomadaire).

Petroleum press service. Petroleum Press Bureau, Londres (mensuel).

Petroleum times, Londres (hebdomadaire).

Quaderni di studi e notizie, Societa Edison, Milan (bi-hebdomadaire).

World oil, Gulf Publication Co., Houston (mensuel).

Sources des données statistiques concernant l'énergie

Les statistiques de l'énergie données dans le présent mémoire proviennent, en partie, de publications générales concernant un ou plusieurs aspects du problème de l'énergie dans plusieurs pays et, en partie, de publications nationales concernant un pays déterminé. Ce dernier groupe de publications comprend plusieurs centaines d'ouvrages et périodiques dont un grand nombre ne traite qu'incidemment de l'énergie. Parmi elles, on peut citer les annuaires statistiques, les revues mensuelles et trimestrielles d'économie politique ou de statistique, les annuaires et bulletins commerciaux, les rapports annuels sur les transports ferroviaires et d'autres publications contenant des renseignements dispersés relatifs à l'énergie. Étant donné que ces publications ne présentent qu'un intérêt limité pour le spécialiste de l'énergie, elles ne figurent pas dans la liste ci-dessous*.

* La plupart de ces publications figurent dans la bibliographie de l'ouvrage « World energy supplies in selected years, 1929-1950 ».

Monde

Conférence mondiale de l'Énergie, Statistical yearbook, 1954, nº 7, Lund Humphries and Co., London.

États-Unis d'Amérique, Bureau of Mines, *International coal trade*, Washington (mensuel). — *International petroleum trade*, Washington (mensuel). — *World petroleum statistics*, Washington (mensuel).

France, Institut national de la statistique et des études économiques. *Annuaire statistique*, 1951. Paris, 1952. (Données historiques sur la production minière mondiale.)

Institut für Konjunkturforschung, *Energiequellen der Welt*, Berlin, 1937.

Organisation des Nations Unies, Commission économique pour l'Asie et l'Extrême-Orient, *Electric power bulletin, 1954*, Bangkok, 1954.

Organisation des Nations Unies, Organisation pour l'alimentation et l'agriculture, *Annuaire statistique des produits forestiers, 1954*. Rome, 1954. — *Annuaire de statistiques agricoles et alimentaires, 1953, Production*, Rome, 1954. — *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture, 1954. Conditions actuelles et perspectives*. Rome, 1954.

Organisation des Nations Unies, Bureau de statistique, *Annuaire statistique, 1954*. New York, 1955. — *Bulletin mensuel de statistique*, avril 1953, novembre 1953, mars 1954, mars 1955, New York (mensuel).

Royaume-Uni, Imperial Institute, *Statistical summary of the mineral industry, 1948-1953*, Londres, 1955.

Société des Nations, *La production mondiale et les prix, 1938-1939*, Genève, 1939. — *Mémorandum sur la production et le commerce, 1913 et 1923-1927*. Genève, 1929.

Union internationale des chemins de fer, *Statistique internationale des chemins de fer 1952*. Paris, 1953.

Union internationale des producteurs et distributeurs d'énergie électrique, *Statistiques, 1951-1952*. Paris, 1954. — *Circulaire périodique*, Paris (publication trimestrielle).

Electricity undertakings of the world, 1953-1954. Benn Brothers Ltd., Londres, 1954.

Afrique

Nigeria

Electricity Corporation of Nigeria, *Annual report, 1952-1953*, Lagos, 1954.

Ouganda

Electricity Board, *Annual report and accounts, 1953*. Londres, 1954.

Union Sud-Africaine

Association of Municipal Employees, *Official South Africa municipal yearbook, 1953-1954*, Pretoria, 1954.

Department of Mines, *Annual report, 1952*, Pretoria, 1953. — *Industrial minerals*, Pretoria (publication trimestrielle).

Office of Census and Statistics, *Census of industrial establishments, 1946-1947*. Pretoria, 1950.

Amérique

Argentine

Dirección Nacional del Servicio Estadístico, *IV Censo general de la nación*, vol. 3, Buenos-Aires, 1952.

Canada

Bureau fédéral de la statistique, *Coal and coke Statistics*, 1952, Ottawa, 1953. — *Refined petroleum products, 1952*, Ottawa, 1953. — *Coke and gas industry, 1952*, Ottawa, 1954. — *Central electric stations, 1952*, Ottawa, 1954. — *Petroleum products industry, 1952*, Ottawa, 1953. — *The motor vehicle, 1953*, Ottawa, 1954. — *Crude petroleum and natural gas industry, 1952*, Ottawa, 1954. — *Railway transport, 1952*, Ottawa, 1954. — *Electric railways, 1952*, Ottawa, 1954.

Colombie

Dirección General del Censo, *Primer censo industrial de Colombia, 1945*, Bogota, 1948.

États-Unis d'Amérique

American Gas Association, *Gas facts, 1953*, New York, 1954.

American Petroleum Institute, *Petroleum facts and figures*, 11e édition. New York, 1954.

Bituminous Coal Institute, *Bituminous coal annual, 1953*, Washington, 1953.

Bureau of Mines, *Minerals yearbook, 1952*, vol. 2, Fuels, Washington, 1954. — *Petroleum and petroleum products*, Washington, décembre 1952. — *Coke and coal chemicals in 1952*, Washington, juillet 1953. — *Natural gas, fourth quarter, 1952*, Washington, 1953. — *Crude petroleum and petroleum products, 1952*, Washington, 1953. — *Sales of fuel oil and kerosene in 1952*, Washington, août 1953.

Department of Commerce, *Historical statistics of the United States, 1789-1945, and continuation to 1952*, Washington, 1949 et 1954.

Federal Power Commission, *Annual report, 1952*, Washington, 1953.

Lyon William H. et Colby D. S., *Production, consumption and uses of fuels and electric energy in the United States in 1929, 1939 and 1947*, Department of Interior des États-Unis d'Amérique, Washington, octobre 1951.

Honduras

Banco Central, *Estadisticas industriales, 1951*, Tegucigalpa, 1953.

Pérou

Sociedad Nacional de Industrias, *Industria Peruana*, Lima (mensuel).

Ministerio de Fomento y Obras Públicas, *Estadistica petrolera del Perú, 1952*, Lima, 1953.

Trinité et Tobago

Petroleum Department, *Administration report, 1952*, Trinité, 1953.

ASIE

Inde

Chief Inspector of Mines, *Annual report, 1950*, Calcutta, 1952.

Ministry of Commerce and Industry, Directorate of Industrial Statistics, *Third census of manufactures, 1948*, Simla, 1951.

Ministry of Irrigation and Power, *Public electricity supply, 1951*, Simla, 1953.

EUROPE

Organisation des Nations Unies, Commission économique pour l'Europe, *Bulletin trimestriel de statistiques du charbon pour l'Europe*, Genève (mensuel).— *Étude sur la situation économique de l'Europe, 1954*, Genève, 1955. — *Récents développements dans la situation de l'énergie électrique en Europe, 1951-1952, 1952-1953*, Genève (publication annuelle). — *Tendances de la consommation de charbon dans les zones occidentales d'Allemagne*, Genève, 1953.

Organisation européenne de coopération économique, *L'industrie de l'électricité en Europe*, Paris, 1954. — *L'industrie du charbon en Europe*, Paris, 1954. — *1954 interim report on oil refinery expansion and consumption trends*, Paris, 1954.

Allemagne occidentale

Die deutsche Mineralölindustrie, 1953, Glückauf, p. 754, Essen, 5 juillet 1954.

Die Kohlenwirtschaft des Bundesgebietes im Jahre 1953, Glückauf, p. 611, Essen, 5 juin 1954.

Ebert Konrad, *Das statistische Bild der Energiewirtschaft im Bundesgebiet*, Glückauf, p. 559, Essen, 22 mai 1954.

Piens H., *Die öffentliche Gasversorgung des Bundesgebietes im Jahre 1952*, Glückauf, p. 1190, Essen, 21 novembre 1953.

Statistisches Bundesamt, *Die industriellen Stromerzeugungsanlagen 1948-1953, Die Industrie der Bundesrepublik Deutschland*, no spécial 6, Wiesbaden, 1955.

Vereinigung deutscher Electrizitätswerke und Verband der deutschen Gas- und Wasserwerke, Ringbuch der Energiewirtschaft, Francfort-sur-le-Main, 1953.

Autriche

Bundesministerium für Verkehr und Verstaatlichte Betriebe, *Erzeugungs-und Verbrauchsstatistik der öffentlichen Electrizitäts-Versorgung in Oesterreich, 1953*. Vienne, 1954.

Belgique

Marchal G. H., *Bilan énergétique de la Belgique, 1951-1952*, Annales des mines de Belgique, vol. 3, no 1, Bruxelles, 1954.

Danemark

Statistiske Departement, *Industriel produktionsstatistik, 1952*, Copenhague, 1954. — *Elektricitetsvaerkerne, 1951-1952*, Copenhague, 1953.

Espagne

Asociación Nacional de Ingenieros Industriales, *Acero y energia*, Barcelone (bi-mensuel).

Consumo de carbón en España, Boletín Minero e Industrial, p. 612, Bilbao, décembre 1953.

France

Comité professionnel du pétrole, *La distribution des produits du pétrole en France, 1953*, Paris, 1954.

Électricité de France, *Statistiques de la production et de la consommation pour l'année 1952*, Paris, 1954.

Gaz de France, *Statistiques de 1952* (et des années précédentes), Paris, 1953.

Italie

L'industria italiana del petrolio nel 1952, Quaderni di studi e notizie, p. 407, Societa Edison, Milan, 1er juin 1953.

Nitze, *Gewinnung und Verbrauch von Naturgas in Italien unter Berücksichtigung der gesamten Energiewirtschaft*, Glückauf, p. 1688, Essen, 18 décembre 1954.

Norvège

Statistisk sentralbyra, *Norges industri, 1952*, Oslo, 1954.

Portugal

Instituto Nacional de Estatística, *Estatistica industrial, 1952*, Lisbonne.

Royaume-Uni

British Electricity Authority, *Fifth report and accounts, 1952-1953*, Londres, 1953.

Ministry of Fuel and Power, *Statistical digest, 1953*, Londres, 1954.

Petroleum Information Bureau, *U. K. petroleum industry statistics relating to consumption and refinery production, 1951 and 1952*, Londres, 1953.

Suède

Kommerskollegium, *Industri, 1952*, Stockholm, 1955.

Suisse

Union suisse du commerce et de l'industrie, *Rapport sur le commerce et l'industrie de la Suisse en 1951*, Zürich, 1952.

Société de Banque suisse, *Un tournant dans la production de l'énergie*, Bulletin nº 3, Bâle, octobre 1954.

Yougoslavie

Bureau fédéral de statistique, *Indeks, juin 1953*, Belgrade (mensuel).

OCÉANIE

Australie

Bureau of Census and Statistics, *Manufacturing industries, Electricity Works, 1952-1953*, nº 31, *Gas Works, 1952-1953*, nº 32, Canberra. — *Primary industries, 1951-1952*, Canberra, 1954. — *Secondary industries, 1951-1952*, Canberra, 1954. — *Statistical bulletin, Minerals and metals*, Canberra (publication trimestrielle).

Bureau of Mineral Resources, Geology and Geophysics, *The Australian mineral industry review, 1952*, Melbourne, 1953.

Nouvelle-Zélande

Census and Statistics Department, *Factory production statistics of New Zealand for the year 1951-1952*, Wellington, 1954.

Estimation des besoins en énergie

par P. Ailleret *

Comme dans l'ensemble du monde, la consommation d'énergie en France est caractérisée, depuis la fin de la première guerre mondiale, par une stabilité dans le domaine du charbon et par un développement rapide dans le domaine des produits pétroliers et de l'énergie électrique.

Tout bilan énergétique, fait en adoptant des coefficients pour ramener à une commune mesure les tonnes de charbon, les kilowattheures hydrauliques, etc., ne décrit plus qu'un aspect d'un ensemble de phénomènes irréductibles par nature à une seule dimension. Mais il est possible d'en donner au moins deux aspects en indiquant comment évolue actuellement le total des énergies primaires (charbon, pétrole, gaz naturel, hydroélectricité) utilisées en France, suivant deux manières différentes de compter les équivalences.

Si l'on se réfère uniquement aux équivalents calorifiques, c'est-à-dire au principe physique de l'équivalence, ce qui a l'avantage de permettre des coefficients immuables, la chaleur qui aurait pu être produite par dégradation de toutes les énergies primaires utilisées en France a augmenté au taux moyen de 4,3 pour cent par an, au cours de la période 1948-1954.

Si, au contraire, on cherche l'équivalence en énergie mécanique ou électrique du total de ces sources primaires en affectant chaque année chacune d'elles du rendement réel qu'ont eu alors les transformations en énergie mécanique ou électrique faites à partir de ces sources primaires (par exemple on suppose la totalité du charbon transformé en énergie électrique avec le rendement même atteint dans toutes les centrales électriques pendant l'année correspondante), on trouve pour la même période un taux annuel moyen d'accroissement de 9,5 pour cent par an.

L'un comme l'autre de ces pourcentages de 4,3 pour cent (équivalence calorique) et 9,5 pour cent (équivalence mécanique) représente un aspect de l'évolution de l'énergie dont le pays a disposé.

Les consommations de charbon resteront probablement assez stables dans les années prochaines, une réduction progressive de la consommation des chemins de fer et du chauffage domestique pouvant compenser la progression de la demande de charbon par les centrales électriques.

La réduction de consommation de charbon par les locomotives va en effet se poursuivre en France, en partie par la « diesélisation », en partie par l'électrification des chemins de fer, stimulée par le succès de la mise au point de la traction à 50 périodes.

La substitution du fuel au charbon dans le chauffage des locaux n'existe en France qu'à un degré beaucoup moins avancé que dans plusieurs autres pays, mais le processus influera sans doute pendant longtemps sur le marché charbonnier et dégagera des disponibilités de charbon dans la mesure où l'approvisionnement en fuel pourra être assuré.

De même, les prévisions faites plus loin en ce qui concerne le développement des consommations d'électricité impliquent pour une part des substitutions variées par lesquelles l'électricité libérera des consommations industrielles et domestiques de charbon. Néanmoins, le total de ces substitutions serait à la longue très inférieur aux besoins nouveaux de charbon nécessaire pour les centrales électriques si celles-ci devaient rester du type classique et être alimentées uniquement en charbon.

Par ailleurs, la production des mines françaises est très peu souple, pour des raisons liées à la nature des gisements et à l'emploi de la main-d'œuvre. Le marché charbonnier français passe facilement d'une situation excédentaire, entraînant des journées de chômage — comme cela vient d'être le cas — à une impossibilité de satisfaire à la demande, comme c'était le cas quelques années plus tôt. La création de la Communauté charbon-acier a modifié l'aspect de ce problème sous certains points de vue, mais il n'en reste pas moins que toute fluctuation des besoins de charbon réagira sur les importations, donc sur les mouvements de devises, la production des mines françaises devant peu varier par rapport au niveau de 55 millions de tonnes par an, visé dans le grand effort de modernisation que vient de faire cette industrie, alors que les consommations se situent actuellement aux environs de 70 millions de tonnes par an, le déficit étant d'ailleurs surtout en charbon à coke.

En somme, il n'y a que peu d'aléas dans l'avenir du charbon et les variations probables de sa consommation en France sont très réduites en comparaison des variations probables des autres formes d'énergie.

* Membre du Comité de l'énergie atomique, Directeur général des études et recherches de l'Électricité de France.

La consommation des produits pétroliers se développe à une cadence exponentielle de l'ordre de 7 pour cent par an. Ce mouvement est essentiellement lié au développement des transports et paraît appelé à se poursuivre. La consommation sera d'ailleurs certainement influencée par le résultat des recherches pétrolières sur le territoire français. Si les espoirs qui sont apparus récemment se matérialisent, la consommation ne subira vraisemblablement pas les mêmes freins que si la plus grande partie du pétrole doit être importée, et son développement en sera d'autant plus grand.

C'est dans ce domaine du pétrole que se trouvent les inconnues les plus grandes et l'incertitude afférente au seul territoire français dépasse naturellement encore beaucoup les incertitudes d'avenir du bilan pétrolier mondial.

Les premiers succès des recherches du pétrole en France, la découverte de gisements déjà importants de gaz laissent penser qu'un grand développement de production est possible, mais les possibilités futures ne sont pas encore chiffrables.

La réaction de la production sur les prix et les charges fiscales rend d'autant plus difficile de supputer l'évolution probable de la demande, entraînée surtout dans le grand mouvement d'expansion des transports de toute nature.

L'énergie électrique se prête à des prévisions plus aisées du fait que les usages électriques sont assez variés pour que des compensations statistiques puissent jouer, et du fait qu'elle peut être produite à base de différentes matières premières.

La consommation française d'énergie sous la forme électrique a été de 45 milliards de kilowattheures pendant l'année 1954. La production se répartit à parts égales entre l'hydraulique et le thermique.

L'évolution de cette consommation a subi de grands troubles au cours des deux guerres mondiales, mais en dehors de ces périodes elle marque, comme l'ensemble de la consommation mondiale, une tendance à se développer suivant une loi exponentielle à la cadence du doublement environ tous les dix ans (soit un taux de croissance annuelle de 7 pour cent).

Les variations de l'activité industrielle se répercutent évidemment sur le taux de croissance de l'ensemble des consommations électriques. L'analyse de la corrélation entre les variations de l'activité industrielle et celles de la consommation électrique a montré que la consommation électrique en France se développe comme le produit de deux facteurs :

a) l'un est un développement exponentiel régulier à un taux proche de 5 pour cent par an qui traduit la tendance propre de l'électricité à étendre le champ de ses applications.

b) l'autre est le volume de l'activité industrielle à la puissance 0,4. Autrement dit, toute variation de 1 pour cent en plus ou en moins de l'activité industrielle entraîne une variation de 0,4 pour cent en plus ou en moins dans la variation des consommations électriques.

Cette formule à deux facteurs, établie il y a quelques années, continue à se vérifier assez bien.

C'est le fait que l'activité industrielle comporte elle-même un élément de hausse systématique qui conduit au total à la hausse générale de 7 pour cent en moyenne par laquelle on peut caractériser la tendance générale de la consommation électrique dans le passé, périodes de guerre mises à part.

Mais la décomposition de la croissance en ses deux filières, outre son utilité lorsqu'il s'agit de comparer les plans propres à l'industrie électrique avec les plans d'activité générale du pays, peut aussi aider à présager l'avenir. Il paraît en effet vraisemblable que l'activité industrielle générale prolongera sa tendance générale de croissance. D'autre part, la tendance propre de l'électricité à se développer, du fait de son rôle toujours plus important dans les techniques les plus nouvelles, paraît aussi devoir se maintenir.

Dans le passé, les applications de l'électricité se sont toujours relayées les unes les autres et tous ceux qui ont l'habitude d'analyser les consommations électriques sont persuadés que le mécanisme de relais continuera, étant donné la grande souplesse de l'électricité pour résoudre un très grand nombre de problèmes différents.

Il n'a jamais été possible de bien prévoir quelles applications se développeraient, mais ceux qui en avaient tiré la conclusion que l'électricité approchait d'une saturation ont jusqu'ici toujours été démentis par les faits.

Le relais de nouvelles applications électriques par d'autres est la clé du processus de développement propre de l'électricité; la télévision, l'électrothermie sont des exemples actuels de ces relais et l'évolution technique en cours ne paraît pas avoir de difficulté à alimenter ces relais par des applications nouvelles successives. La tendance générale de développement des besoins d'électricité paraît donc devoir se maintenir.

Ces motifs pour ne pas envisager une saturation valent pour tous les pays du monde. Pour la France, une garantie plus grande qu'il n'y aura pas de saturation à bref délai résulte de ce que sa consommation par habitant vient seulement de dépasser le millier de kilowattheures par an. Or, il n'apparaît encore aucun signe de saturation dans certaines régions du monde très électrifiées où les consommations par habitant atteignent des chiffres 3 ou 4 fois plus élevés. Cela donne à la France une certitude encore plus grande que la saturation n'est pas proche.

La progression future probable de la consommation reste donc un développement exponentiel à une cadence voisine du doublement tous les dix ans.

Néanmoins, il est dans la nature des choses que nos prévisions soient entachées d'une incertitude d'autant plus grande qu'elles sont à plus long terme. La réponse à la question du développement dans vingt ans se traduirait donc mieux par une courbe de probabilité que par un chiffre ferme.

L'expérience du passé donne des informations sur ce degré d'incertitude par l'examen de la dispersion des taux de croissance lorsque l'on considère séparément divers intervalles de temps et divers pays situés tous dans des conditions comparables de développement.

En éliminant les époques où chaque pays a été atteint par la guerre sur son territoire même, les courbes de développement de consommation des divers pays de l'Europe de l'Ouest tracées en échelle logarithmique manifestent la même tendance générale à long terme, mais avec des irrégularités importantes entre les croissances dans les différents pays aux diverses époques.

Cette dispersion peut être appréciée en regroupant les courbes prises chacune successivement, d'abord à partir de 1925, puis à partir de 1926, 1927, etc., et en faisant partir toutes les courbes de la même origine.

On obtient ainsi un faisceau de courbes « en queue de cheval » qui caractérise la dispersion dans les cadences de croissance*. On peut la mesurer en traçant les quartiles supérieur et inférieur, l'un qui n'est dépassé que dans 25 pour cent des cas, l'autre au-dessous duquel on ne tombe que dans 25 pour cent des cas.

En faisant ce travail pour l'intervalle 1925-1954 et pour un ensemble de pays de l'Europe de l'Ouest bien comparables entre eux, on obtient à dix ans de distance de l'origine les dispersions suivantes :

— dans 25 pour cent des cas seulement, la consommation a été multipliée par plus de 2,1 et dans 25 autres pour cent des cas seulement, elle n'a été multipliée que par moins de 1,7.

— ainsi la dispersion peut se caractériser par le fait que dans la moitié des cas la progression est restée dans l'intervalle $\pm$ 10 pour cent autour de 1,9.

Le même calcul fait sur les développements de consommation des grandes régions des États-Unis d'Amérique et du Canada conduit sensiblement au même taux de dispersion des croissances sur un intervalle de dix ans.

Les données statistiques sont un peu insuffisantes pour chiffrer de la même manière la dispersion des croissances sur un intervalle de vingt ans. L'écart paraît alors être voisin de $\pm$ 15 pour cent avec une probabilité de 50 pour cent d'être, soit au-dessus, soit au-dessous de cet intervalle.

Bien entendu, ceci n'est extensible à l'avenir que si celui-ci comporte les mêmes causes d'irrégularités que dans le passé; or le risque n'est pas négligeable que les écarts accidentels soient plus élevés dans l'avenir que dans le passé; d'autre part, la tendance systématique ne sera peut-être pas la même.

Il paraît raisonnable d'en conclure que la zone la plus probable dans laquelle le rapport de la consommation dans vingt ans à la consommation actuelle a le plus de chances de se trouver, va de 3 à 4,5, mais avec des probabilités non négligeables d'être au-dessous de 3 ou au-dessus de 4,5.

A plus long terme, l'écart probable s'accroît de plus en plus vite et il semble impossible de citer un chiffre quelconque, ni pour la valeur probable, ni pour la dispersion, à l'échéance de la fin du siècle. Cela paraît d'autant plus impossible que le progrès technique a tendance à s'accélérer et que les incertitudes sur le dernier quart de ce siècle sont considérablement plus grandes que les incertitudes au cours des vingt prochaines années.

Tout ce que l'on peut dire, c'est que nous ne prévoyons pas actuellement de forme nouvelle d'énergie qui viendrait concurrencer la forme électrique et que les besoins continueront à croître par des relais successifs d'applications nouvelles, de sorte qu'il est possible, dans une certaine mesure, d'extrapoler la croissance actuelle.

Bien entendu, l'extrapolation peut se faire suivant bien des lois : admettre que la progression exponentielle du passé se poursuivra dans l'avenir n'est que la plus simple des formules d'extrapolation.

Il serait facile d'en bâtir d'autres, mais ferions-nous autre chose que déguiser notre ignorance sous un appareil mathématique médiocre en imaginant une loi logistique qui coïnciderait pour le passé avec une exponentielle, mais s'infléchirait ensuite pour traduire l'hypothèse d'une saturation future dont l'expérience ne décèle encore aucun signe ? Les coefficients de cet infléchissement étant entièrement inconnus, nous n'ajouterions rien de réel par cette complication de la formule d'extrapolation.

La conclusion est donc que, si les prix de l'énergie dans l'avenir ne subissent pas de trop grands écarts par rapport aux prix actuels, le développement exponentiel de la demande paraît devoir se poursuivre, l'intervalle de 3 à 4,5 pour le coefficient d'augmentation probable au cours des vingt prochaines années paraissent traduire une dispersion qui deviendrait ensuite beaucoup plus grande si l'on voulait hasarder des prévisions chiffrées pour des dates plus éloignées.

Toute prévision non assortie d'une estimation de la dispersion n'ayant pas vraiment une portée quantitative, il paraît préférable de se borner à dire que rien ne permet actuellement de penser que ce développement des besoins d'énergie électrique ne se poursuivra pas ensuite à une cadence analogue.

---

* *Circulaire périodique n° 19* de l'Union internationale des Producteurs et Distributeurs d'Énergie électrique, 2e trimestre 1952 : Résumé des expériences du passé sur la croissance des consommations d'énergie électrique, pages 12 et 13.

L'humanité doit donc se préparer à faire face à des besoins considérables d'énergie et elle n'a, par conséquent, pas trop de temps devant elle pour se mettre à exploiter à grande échelle les stocks dont elle dispose sous forme d'uranium et de thorium – et, peut-être, les flux d'énergie énormes au milieu desquels elle vit, le rayonnement solaire par exemple.

L'énergie atomique arrive déjà à l'échelle des possibilités industrielles et ses prix de revient probables, encore très incertains, paraissent baisser en même temps qu'ils commencent à se préciser. Il est encore impossible de prévoir où ces prix se stabiliseront. S'ils se stabilisent un peu au-dessus ou un peu au-dessous des prix de l'énergie classique, l'énergie atomique jouera dans le premier cas le seul rôle de relais à l'épuisement des énergies classiques, dans le deuxième cas, le rôle d'une source concurrente, mais sans que cela réagisse beaucoup sur les niveaux de consommation.

Il n'en serait pas de même si les prix de revient arrivaient à descendre bien au-dessous des coûts des moyens classiques de production de l'énergie. Sans doute l'« élasticité » de la demande d'énergie est faible, aussi bien pour la force motrice que pour les usages domestiques; sans doute aussi, une baisse massive du prix de production, en gros, ne ferait qu'une faible baisse relative du prix de revient dans la livraison, au détail, étant donné que le coût de la distribution serait inchangé.

Mais il resterait la possibilité de fournir de gros blocs de puissance à très bas prix. Ainsi des débouchés spéciaux pourraient apparaître. La France a déjà vu l'influence de semblables possibilités lorsque le début de la technique des aménagements des chutes d'eau dans les Alpes y a apporté des énergies à très bas prix de revient qu'il était impossible d'exporter au loin. Des industries électrochimiques et électrométallurgiques se sont alors rapidement développées. Certaines d'entre elles, l'azote à l'arc par exemple, ont disparu lorsque les transports d'énergie ont permis de tirer davantage de valeur des énergies exceptionnellement bon marché dont on disposait dans quelques fonds de vallées.

Mais la réapparition de sources éventuelles d'énergie à très bon marché pourrait rendre viables des procédés de fabrication très simples, mais gros consommateurs d'énergie, qui ne peuvent actuellement être utilisés.

De même dans le domaine du chauffage, des possibilités de consommations importantes existent dans les zones où les densités superficielles de consommation sont assez fortes pour que les coûts de distribution ne soient pas trop élevés.

On ne peut donc pas négliger les effets de l'élasticité de la demande : la consommation même d'énergie électrique pourrait prendre un développement supplémentaire important si un prix de revient très bas de l'énergie atomique lui permettait d'aller au-delà d'un rôle de garantie contre une disette éventuelle future de combustibles classiques, au-delà même d'un rôle de substitution pure et simple à ces combustibles, jusqu'à étendre le champ des usages de l'énergie par une baisse importante du prix de revient de sa production par grosses quantités.

Le monde a besoin d'une nouvelle source d'énergie

par E. A. G. Robinson et G. H. Daniel *

La présente étude traite tout d'abord de l'augmentation de la demande mondiale d'énergie et présente ensuite une évaluation des réserves encore existantes des principales sources classiques d'énergie. La préférence qui se manifeste dans le monde entier pour la transformation des combustibles primaires en électricité livrée par la suite au consommateur a une incidence sur la nécessité de produire de l'énergie nucléaire; cette question est examinée dans une troisième partie. La dernière partie fait la somme des conclusions auxquelles on a abouti, et essaie de dégager les perspectives d'avenir. Le prix de revient de certains des combustibles actuels a tendance à s'élever, et ce fait est loin d'être sans importance lorsqu'on étudie le besoin de nouvelles sources d'énergie; aussi certaines données relatives aux prix de revient figurent-elles dans l'appendice.

Je crois pouvoir affirmer que l'objet principal de cette étude et du groupe de documents dont elle fait partie, est de servir de point de départ aux débats de caractère plus technique qui suivront, d'insister sur l'urgence du problème et d'indiquer le rythme auquel il importe que le monde mette au point et développe la production d'énergie nucléaire. J'insiste sur ce point, car je n'ai pas besoin de vous dire qu'il est impossible de prédire avec exactitude la demande d'énergie qui se manifestera en 1975 ou en 2000. Tout ce que l'on peut espérer dans ce domaine est de donner des ordres de grandeur probables. Mais on a alors à choisir entre deux méthodes : on peut essayer d'évaluer quels seront à ces dates les besoins maxima en énergie dans le monde et de déterminer dans quelle mesure les sources d'énergie classiques ne suffiront pas à y faire face; c'est la méthode qu'a utilisé M. Putnam dans son étude *Energy in the future* si riche en aperçus nouveaux sur l'énergie dans l'avenir; l'autre méthode consiste à essayer de déterminer les besoins minima; s'il est déjà, comme je le crois, absolument urgent de développer l'utilisation de l'énergie nucléaire uniquement pour faire face à ces besoins minima, il en va de même à plus forte raison si les besoins se révèlent être plus grands.

Si j'insiste sur ce point dès maintenant, c'est parce que j'ai choisi délibérément la seconde méthode, qui consiste à déterminer les besoins minima. J'espère que nombreux seront ceux qui, parmi vous, trouveront que mes évaluations sont trop faibles. Si elles pèchent de ce côté, la nécessité de mesures urgentes sera démontrée avec encore plus de force.

J'aimerai encore présenter une seconde considération en guise d'introduction. Le raisonnement qui part d'une prévision du développement de l'activité mondiale, pour tenter ensuite d'évaluer les besoins en énergie à partir de cette première hypothèse, risque d'être fallacieux et de former un cercle vicieux. Les disponibilités d'énergie constituent elles-mêmes un des facteurs principaux qui influent sur le rythme de l'expansion économique. Si l'apparition de l'énergie nucléaire devait provoquer une sérieuse modification du coût relatif des énergies de diverses provenances, comme ce fut le cas lorsque l'homme réussit à utiliser le charbon et la machine à vapeur, les méthodes de prédiction plus simples seraient sans valeur. Je dois donc nécessairement partir de l'hypothèse que le principal effet de l'énergie nucléaire sera de maintenir le coût de l'énergie à un niveau qui ne sera guère différent de celui que nous constatons aujourd'hui. Mais ceci paraît peu probable dans certaines parties du monde où le prix du transport des combustibles est actuellement très élevé, ou même dans certaines régions d'un pays donné où le combustible ne se trouve pas en abondance à proximité d'autres ressources précieuses. Il convient de tenir compte de ce fait.

LA DEMANDE D'ÉNERGIE

L'accroissement de la consommation de 1860 à 1954

Au cours des cent dernières années, l'utilisation de l'énergie par l'homme a été multipliée grâce à l'emploi des combustibles commerciaux — charbon,

---

Original : anglais.

* E. A. G. Robinson, Université de Cambridge, et G. H. Daniel, Ministère des combustibles et de l'énergie, sont les deux auteurs de la présente étude. Le premier s'est chargé principalement d'analyser l'accroissement de la demande d'énergie dans l'avenir; le second s'est chargé des parties qui ont trait aux réserves de combustibles et aux approvisionnements futurs, ainsi que de l'établissement de la documentation de base. La première personne du singulier, utilisée dans le cours du présent document, désigne donc l'orateur qui a présenté ce texte, et non pas l'un ou l'autre de ses auteurs.

pétrole, gaz naturel et énergie hydraulique. Les diagrammes de la figure 1 montrent les divers accroissements qui ont eu lieu *.

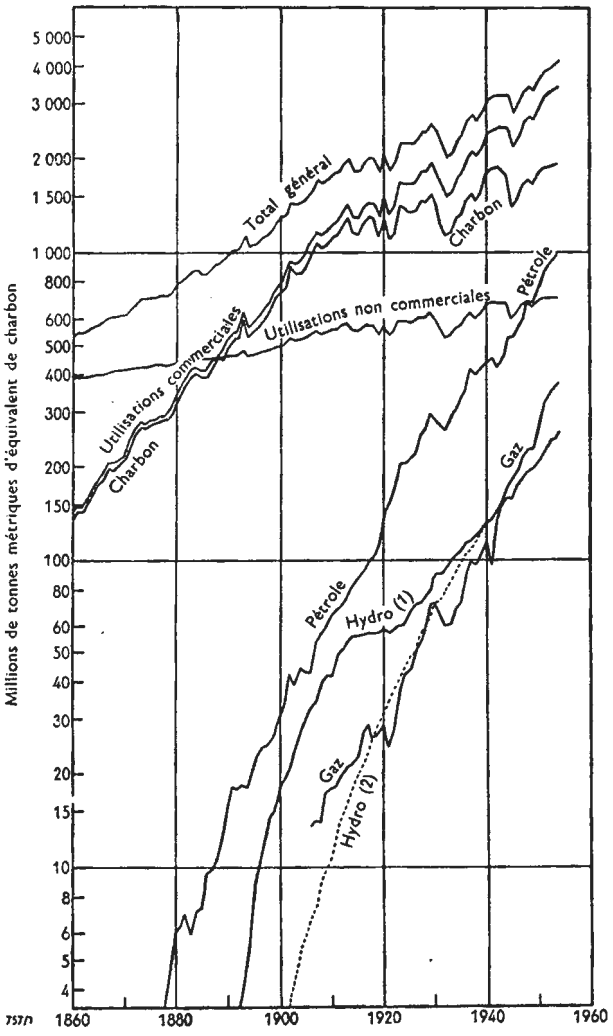


Figure 1. — Ressources mondiales en énergie, par sources d'énergie (1860-1954)

Une des caractéristiques frappantes de ces diagrammes est l'augmentation relativement régulière, pendant toute la période considérée, de la consommation totale d'énergie, y compris le bois et les déchets de la production agricole. Cette croissance se manifeste à la cadence de 2 pour cent par an. Pendant la deuxième moitié du dix-neuvième siècle, l'emploi du bois a baissé et celui du charbon a augmenté rapidement. Pendant la première moitié du vingtième siècle, la consommation totale de combustibles classiques a augmenté assez régulièrement de 2 pour cent chaque année, mais pour le charbon l'accroissement s'est ralenti et l'augmentation de la demande a été satisfaite surtout grâce au pétrole, au gaz naturel et à l'électricité d'origine hydraulique, dont les taux d'accroissement ont été en moyenne de 5 à 6 pour cent par an. Pour les années 1929 à 1950, le tableau suivant indique avec plus de précision le rythme auquel a varié la consommation d'énergie.

Entre 1950 et 1954, la consommation s'est élevée sensiblement plus vite que ne l'indiquait la tendance à long terme, et au cours de cette dernière année le monde a utilisé en combustibles classiques l'équivalent de 3,3 milliards de tonnes de charbon. Les chiffres de 1950, qui n'ont pour ainsi dire pas subi l'incidence de conditions économiques anormales, peuvent servir de base satisfaisante pour des prévisions à long terme.

Rapport entre la consommation d'énergie et l'activité industrielle

La consommation totale d'énergie est étroitement liée à l'activité industrielle et aux niveaux de vie; la figure 2 indique la répartition des pays, en 1949, selon la consommation par habitant de combustibles commerciaux et le revenu par habitant évalué par l'Organisation des Nations Unies [1] **. Les chiffres sont nécessairement inexacts, parce que le problème que pose la conversion des revenus des différents pays en une monnaie unique est presque insoluble, et qu'il est difficile d'obtenir, pour tous les pays, des statistiques du revenu national et de la consommation d'énergie sûres et comparables. Pour l'ensemble du monde, la consommation moyenne d'énergie dépasse légèrement l'équivalent d'une tonne de charbon par habitant. Mais les écarts sont considérables. La consommation par habitant en Amérique du Nord est à peu près huit fois plus élevée que la moyenne valable pour le monde entier. De la totalité des ressources d'énergie commercialement disponibles en 1950, on estime que 88 pour cent environ ont été consommés par 28 pour cent de la population du monde dans les pays industrialisés d'Amérique du Nord, d'Europe et en U.R.S.S.

Il existe un rapport significatif entre les variations dans le temps de l'utilisation de l'énergie et

* Les diagrammes ont été établis en grande partie d'après les statistiques de production qui, pour l'ensemble du monde, donnent une indication approximative de la tendance générale de la consommation. Ils reposent en partie sur les renseignements qui figurent dans l'ouvrage de P. C. Putnam, *Energy in the future*, D. Van Nostrand Co. Inc., New York, 1954, et en partie sur des données tirées de publications des Nations Unies ou d'autres provenances. On n'a pas utilisé les chiffres de Putnam pour l'énergie d'origine hydraulique, mais on a représenté celle-ci par la quantité de charbon que consommerait en moyenne une centrale thermique pour produire la même quantité d'énergie. La courbe hydro (1) a été tracée dans l'hypothèse où le charbon aurait été transformé en électricité avec un rendement croissant depuis 3 pour cent en 1895 pour atteindre 20 pour cent en 1940. La courbe hydro (2) correspond à l'hypothèse où le rendement aurait été constamment égal à 20 pour cent pendant toute cette période; elle représente donc la variation du nombre des kilowattheures produits.

** Les numéros entre crochets renvoient à la bibliographie qui figure à la fin du mémoire.

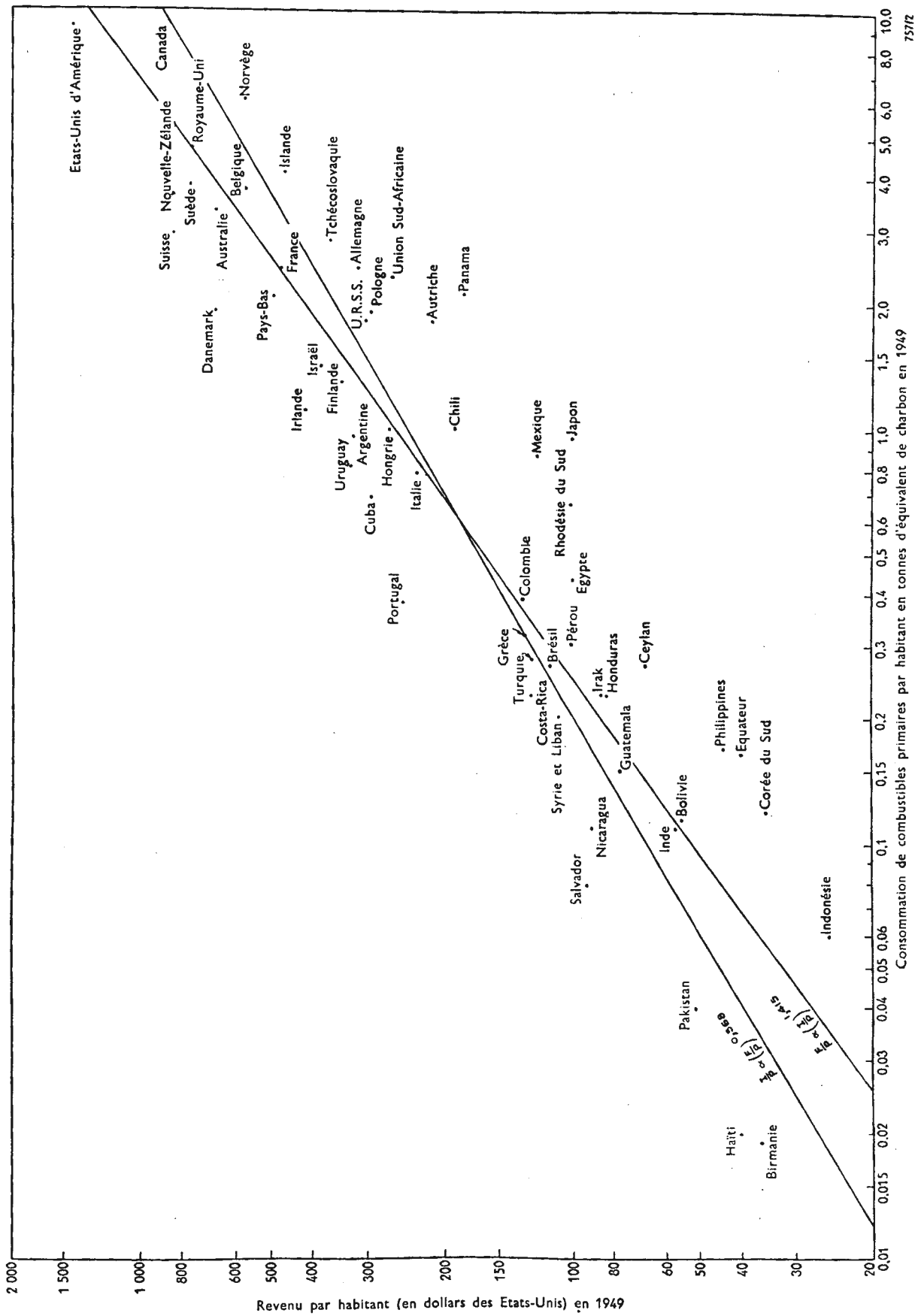


Figure 2. — Revenu et consommation de combustibles primaires par habitant en 1949.

Tableau 1

Consommation mondiale de combustibles primaires de 1929 à 1950[a]

(En millions de tonnes métriques d'équivalent de charbon)

	Combustibles solides	Pétrole	Gaz naturel	Énergie hydraulique[b]	Total
1929	1 410	270	80	100	1 860
1950	1 580	700	270	200	2 750
Pourcentage moyen annuel d'augmentation.	0,5	4,7	6,3	3,3	1,9

[a] Tiré de *Ressources mondiales en énergie au cours de certaines années de la période 1929-1950.* Nations Unies, Études statistiques, série J, nº 1, 1952.

[b] Les chiffres relatifs à l'énergie hydraulique sont exprimés en équivalent de charbon, sur la base de la quantité de charbon qui eût été nécessaire pour produire 1 000 kWh d'énergie électrique (0,9 tonne en 1929 et 0,6 tonne en 1950). Pour cette raison, le pourcentage d'augmentation indiqué dans la dernière ligne est inférieur à celui de la production réelle d'énergie hydraulique (5,3 pour cent par an, de 111 300 millions de kilowattheures en 1929 à 331 800 millions de kilowattheures en 1950). Une tonne de pétrole brut avant conversion est considérée comme équivalent à 1,3 tonne de charbon, et 1 000 mètres cubes de gaz naturel à 1,33 tonne de charbon.

de l'activité économique. Ce rapport varie d'un pays à l'autre et à l'intérieur d'un même pays, selon les différents stades de développement. Établie d'après les estimations de la consommation d'énergie en 1929 et en 1950 faites par l'Organisation des Nations Unies, la figure 3 montre, pour les principaux pays d'Europe occidentale et d'Amérique du

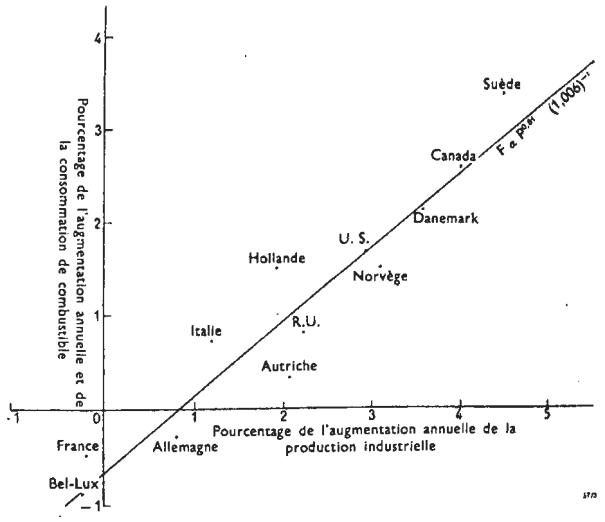


Figure 3. — Variations de la consommation de combustibles primaires et de la production industrielle (1929-1950)

Nord, le rapport qui au cours de cette période a existé entre la consommation totale de combustibles et la production de l'industrie manufacturière. La droite qui représente le mieux ce rapport montre que, pour toute augmentation de la production de l'ordre de 1 pour cent, il y a une augmentation de 0,81 pour cent de la consommation d'énergie, qui est en partie compensée par une tendance de la consommation à baisser de 0,6 pour cent chaque année. On peut généraliser davantage en disant que la consommation de combustibles primaires augmente avec le temps d'environ 0,6 pour cent, chaque fois que l'activité industrielle augmente de 1 pour cent. Ceci vient confirmer la relation qui semble ressortir des indices généraux d'évolution, d'après laquelle une augmentation annuelle de 2 pour cent de la consommation mondiale d'énergie correspond à une augmentation annuelle tout juste supérieure à 3 pour cent de la production industrielle.

Tableau 2

Consommation mondiale de combustibles primaires et production industrielle de 1913 à 1954

(1937 = 100)

	Consommation de combustibles primaires[a]	Production industrielle[b]
1913.	69	55
1921.	62	47
1929.	93	80
1937.	100	100
1946.	109	105
1950.	137	157
1954.	161	197

[a] Charbon, pétrole, gaz naturel et énergie hydraulique.

[b] L'indice de la production industrielle mondiale est tiré de l'ouvrage de W. S. et E. S. Woytinsky, *World Population and Production*, 1953, et complété, pour les années plus récentes, par l'indice donné dans le *Bulletin mensuel de statistique* de l'Organisation des Nations Unies.

Quel est le taux d'accroissement probable des besoins futurs en énergie ?

Pendant près de cent ans, la courbe de la consommation des combustibles commerciaux a été remarquablement régulière, s'élevant à un taux annuel de 2 pour cent environ. Cette croissance est la résultante d'un certain nombre de facteurs dont l'action a été simultanée : le taux d'accroissement de la population, le taux d'expansion de l'industrie, le rythme auquel les techniques d'utilisation des combustibles se sont améliorées, les changements survenus dans la composition de la demande totale de combustibles. Je pense que la meilleure méthode pour prévoir les variations futures probables du phénomène considéré est d'examiner brièvement chacun des facteurs ci-dessus et de voir, sous chaque

rubrique, dans quel sens la variation entraînera probablement un écart par rapport aux 2 pour cent enregistrés jusqu'ici.

Accroissement de la population

De 1850 à 1900, la population du monde, autant que l'on peut en juger d'après les chiffres dont quelques-uns sont très incertains, a augmenté d'environ 7,5 pour cent tous les dix ans; de 1900 à 1950, ce taux atteint environ 9 pour cent pour le même nombre d'années. Divers essais ont été faits pour estimer ce que serait la population du monde en 1975 et en l'an 2000, mais les écarts entre les prévisions sont importants. Pour cette période, les prévisions sont particulièrement difficiles à faire. L'accroissement rapide constaté pendant les deux cents dernières années est surtout dû à une diminution extraordinaire du taux de mortalité provoquée par les progrès révolutionnaires de la médecine et le relèvement des niveaux de vie, l'ajustement des taux de natalité à ces nouveaux taux de mortalité ne survenant qu'avec un retard très appréciable. La baisse du taux de natalité en Amérique du Nord et dans de nombreux pays d'Europe a maintenant atteint un point où les naissances et les décès s'équilibrent à peu près. Mais les progrès de la médecine commencent seulement à produire leurs effets en Asie où se trouvent concentrées les populations les plus nombreuses, et il faut s'attendre à une très forte augmentation de la population pendant la phase de transition. Ce que nous ne pouvons pas prévoir, c'est la rapidité avec laquelle les ajustements se feront, et le chiffre qu'atteindra la population au terme de cette évolution. Certaines indications donnent à penser que l'Asie procédera peut-être plus vite à ces ajustements, que l'Europe a été lente à effectuer. Pour ma part, je suis enclin à préférer l'estimation inférieure pour l'accroissement de la population* et à penser que la population mondiale passera de 2 400 millions d'âmes au total, en 1950, à environ 3 200 millions en l'an 2000. Le taux d'accroissement démographique serait donc dans l'avenir de 6 pour cent tous les dix ans. Si ce taux se maintenait jusqu'en 2050, la population mondiale atteindrait à cette date le chiffre d'environ 4 300 millions. Ce sont là des estimations que l'on a délibérément voulu maintenir aux chiffres les plus bas possibles; elles soulèvent cependant de très graves problèmes ** quant aux possibilités d'approvisionnement en denrées alimentaires et à la structure de l'industrie et du commerce, si l'on veut que les régions où la population doit le plus augmenter puissent importer en provenance d'autres régions du monde où il semble possible d'accroître la production, suffisamment de biens pour faire face à leurs besoins probables.

Développement de l'industrie

Le taux d'accroissement de l'activité industrielle au cours des dernières années a sensiblement dépassé celui de la tendance à long terme qui, comme je l'ai déjà indiqué, s'inscrit aux environs de 3 pour cent. Ceci semble résulter de divers facteurs. Un certain nombre de pays en sont encore au stade de relèvement rapide consécutif au recul enregistré pendant les années de guerre et à la crise mondiale des années qui ont suivi 1930. D'autres ont très rapidement passé d'une économie à faible rendement, essentiellement tributaire de l'agriculture, à une économie moderne, de type industriel, à rendement élevé. Certains pays industrialisés adoptent maintenant les techniques les plus modernes beaucoup plus vite qu'autrefois. En même temps, dans le monde entier, on a presque atteint la capacité limite de production, telle qu'elle est prévisible pour l'avenir rapproché tout au moins; et c'est là un stimulant qui a poussé les pays à développer cette capacité de production et à économiser la main-d'œuvre et les matières premières. L'accroissement de la production tend à être d'autant plus grand que la pression sur les ressources disponibles est plus forte.

Tous ces facteurs n'agiront pas indéfiniment. A l'heure actuelle les ruines accumulées par la guerre sont complètement relevées presque partout. L'expansion de l'industrie par rapport aux autres activités se ralentira probablement dans certains pays à mesure qu'il y aura moins de possibilités de déplacer vers l'industrie la main-d'œuvre employée à des formes désuètes d'agriculture. Mais, à d'autres égards, le taux d'accroissement peut augmenter. Aux États-Unis et dans la plupart des pays d'Europe où il a été plus élevé que pendant l'intervalle entre les deux guerres, ce phénomène est provoqué, plus que par le passé, par une augmentation de la production par année d'ouvrier. De plus l'activité industrielle se développera d'une manière considérable si les pays d'Asie réussissent à se dégager de l'équilibre malthusien où l'accroissement de la production est sensiblement égal à celui de la population, pour atteindre le stade de l'expansion cumulative où l'accroissement de la production dépasse celui de la population, ce qui laisse une marge croissante pour développer encore la production. L'Amérique du Nord et la plupart des pays d'Europe et des régions où des Européens se sont fixés ont atteint ce stade à la fin du dix-huitième siècle ou au dix-neuvième siècle; l'U.R.S.S. et le Japon au cours des cinquante dernières années; la Chine, l'Inde, le Pakistan et d'autres pays d'Asie font des efforts acharnés pour y parvenir. Les pays dont l'économie est actuellement retardataire consomment peu d'énergie à l'heure actuelle. Si l'on doit s'attendre à un développement bien plus rapide de leur part, il n'en reste pas moins qu'au cours des 25 années à venir, leur consommation de combus-

---

* Voir par exemple l'analyse des hypothèses récemment formulées par Notestein et d'autres; Woytinsky, *op. cit.*, p. 256-62.

** Une très intéressante étude de certains de ces problèmes vient d'être faite par Sir Harold Hartley dans Science and Industry, *The Pattern of the Future.* The First Fawley Foundation Lecture, Université de Southampton, 1954.

tibles ne constituera probablement pas un pourcentage élevé de la consommation mondiale totale. Le taux d'accroissement de la consommation d'énergie sera probablement beaucoup plus influencé par celui de l'Amérique du Nord, de l'Europe et de l'U.R.S.S., toutes régions où la production industrielle augmente et continuera vraisemblablement à augmenter à une cadence sensiblement supérieure à 3 pour cent; de 1948 à 1954, le taux d'accroissement de la production industrielle s'est probablement approché de 7 pour cent dans ces régions qui représentent les cinq sixièmes de la production industrielle du monde.

Une mise en garde s'impose toutefois. Une forte proportion de l'énergie du monde est actuellement utilisée pour l'extraction, la transformation et le traitement des minerais et métaux*. Certains signes permettent déjà de prévoir qu'au cours des cinquante années à venir, certains des métaux non-ferreux et des ferro-alliages vont se raréfier; il en est d'autres qui, bien que relativement abondants à l'heure actuelle, poseront vraisemblablement des problèmes de plus en plus délicats si le taux d'accroissement de leur consommation reste pendant un siècle de l'ordre de grandeur que j'ai mentionné. Le Rapport Paley [2] a certes souligné l'existence de ce problème, mais on ne l'a pas encore systématiquement analysé en regard des besoins de l'ensemble du monde, ni pour une période aussi longue que celle que nous étudions maintenant. Si les métaux deviennent plus rares et plus coûteux, nous devons nous attendre à des répercussions à long terme sur la structure générale de l'activité industrielle et sur son taux d'accroissement, et ces répercussions peuvent à leur tour influer sur la demande d'énergie.

Techniques d'utilisation des combustibles

Les techniques d'utilisation des combustibles ont fait de très rapides progrès au cours des cent dernières années. Les principales réalisations techniques, comme l'invention de la turbine à vapeur, la production de l'énergie dans de grandes centrales remplaçant une multitude de petites usines à faible rendement, la souplesse et la facilité plus grandes d'utilisation du pétrole, de l'électricité et du gaz, ont permis d'améliorer considérablement les rendements, ce qui explique dans une large mesure que la consommation d'énergie ait augmenté moins vite que la production industrielle. Putnam [3] a émis l'hypothèse qu'entre 1860 et 1947 le rendement du système mondial de production d'énergie a probablement plus que doublé, la majeure partie de cet accroissement ayant eu lieu depuis 1900. Cet accroissement du rendement entre 1900 et 1950 semble avoir produit une augmentation de 2 pour cent du tonnage des combustibles primaires, et une augmentation de 3 pour cent de l'énergie utile produite. Putnam s'est risqué à faire une estimation de l'allure de la tendance future; pour l'indice du rendement mondial, qu'il a fixé à 22 pour cent environ pour 1947, il a avancé pour l'an 2000 une valeur légèrement supérieure à 35 pour cent. En tant que profane s'adressant à des professionnels, j'hésite à critiquer ce chiffre. Il me semble probable que, pour certains usages, il sera difficile d'augmenter encore le rendement à mesure que l'on approche des limites théoriques. Pour certaines applications, comme par exemple la production d'électricité, l'augmentation du rendement est d'ores et déjà plus lente. Et s'il s'avère nécessaire de remplacer de fortes quantités de pétrole par du charbon synthétique ou par la distillation de schistes bitumineux, on perdra d'importantes quantités de combustibles au cours de ces opérations. D'autre part, il semble que l'on emploie les combustibles, en proportions croissantes, à des usages pour lesquels le rendement moyen est ordinairement plus faible. L'extrapolation de la courbe du rendement faite par Putnam impliquerait que pendant le demi-siècle qui précédera l'an 2000, un accroissement annuel de 2 pour cent de la quantité de combustibles disponibles entraînera un accroissement de 2,75 pour cent de la production annuelle d'énergie.

Emploi de l'énergie

Les divers usages de l'énergie varient beaucoup d'un pays à l'autre. Dans l'ensemble du monde, un tiers environ de toute l'énergie produite à partir de combustibles ou de sources hydrauliques est probablement utilisé pour le chauffage, l'éclairage et la cuisine, les deux autres tiers servant à l'industrie et aux transports. La plupart des pays d'Europe et d'Amérique du Nord utilisent un peu moins d'un tiers de leur énergie pour le chauffage, l'éclairage et la cuisine; beaucoup de pays moins industrialisés, particulièrement sous les climats froids, consacrent plus de la moitié de leur énergie à ces mêmes usages. Il est vraisemblable qu'à un moment donné, cette demande approchera de son point de saturation; au Royaume-Uni, on a pu constater nettement que l'élasticité de cette demande** par rapport au revenu est faible. On constate d'autre part qu'une population plus riche consacre ordinairement une fraction plus élevée de son revenu aux services. Il ressort de ces deux considérations qu'un taux d'accroissement donné pour la totalité des ressources en énergie utilisée à toutes fins peut aller de pair avec un taux d'accroissement beaucoup plus élevé de l'énergie disponible pour l'industrie manufacturière.

---

* Un huitième environ de l'énergie produite dans le monde est utilisée pour la seule fabrication du fer et de l'acier.

**C'est-à-dire le quotient du pourcentage d'augmentation des dépenses consacrées à un produit donné par le pourcentage d'augmentation du revenu total ou de l'ensemble des dépenses.

Tendance future de l'accroissement

Comment ces divers facteurs, par leur action conjuguée, vont-ils influer sur la tendance de l'accroissement? Une augmentation moyenne de 2 pour cent, 2,5 pour cent et 3 pour cent par an à partir de 1950 se refléterait sur la consommation totale, au cours des cent années à venir, d'une manière que nous indiquons au tableau 3.

Tableau 3

Demande mondiale totale de combustibles primaires pour certaines valeurs du taux composé d'accroissement

(En milliards de tonnes d'équivalent de charbon par an)

	2 pour cent par an	2,5 pour cent par an	3 pour cent par an
1950 . . .	2,8	2,8	2,8
1975 . . .	4,5	5,1	5,8
2000 . . .	7,4	9,5	12,1
2025 . . .	12,1	17,5	25,2
2050 . . .	19,9	32,5	52,9

Je crois que, tout bien pesé, il y a des raisons plus nombreuses et plus valables de s'attendre à ce que dans l'avenir le taux composé d'accroissement dépasse les 2 pour cent enregistrés par le passé, que de croire qu'il tombera au-dessous de cette valeur. Pour ma part, je considère donc qu'un taux d'accroissement de 2 pour cent de la consommation de combustibles primaires représente un minimum raisonnable; il n'est guère vraisemblable que ce taux prenne des valeurs plus faibles, à moins de graves pénuries de matières premières, d'une guerre ou de quelque autre désastre. J'estime qu'une consommation annuelle de l'ordre de 7,5 milliards de tonnes d'équivalent de charbon en l'an 2000 est beaucoup plus vraisemblablement au-dessous qu'au-dessus de la réalité. Je pense qu'un chiffre de 10 milliards de tonnes serait peut-être finalement plus proche de la vérité.

LES RÉSERVES DE COMBUSTIBLES CLASSIQUES

Charbon

On peut distinguer en principe deux modes différents d'évaluation des réserves de charbon : une évaluation géologique de la quantité de houille contenue dans le sol dans certaines limites de profondeur et d'épaisseur des gisements, et une évaluation de celle qu'il est techniquement et commercialement possible d'extraire. La première de ces deux estimations est déjà assez délicate, mais les incertitudes qui s'attachent aux facteurs techniques et commerciaux dont dépend la quantité de charbon que l'on pourrait extraire sont encore plus grandes. Les résultats obtenus par les experts en la matière diffèrent beaucoup selon qu'ils attribuent plus ou moins d'importance à ces facteurs.

Les principales données relatives aux réserves de charbon sont contenues dans les Annuaires statistiques de la Conférence mondiale de l'énergie dont les premières définitions couvraient tous les charbons ayant une valeur économique et dont on pouvait raisonnablement supposer l'existence en couches d'au moins 30 cm d'épaisseur à moins de 1 300 mètres (4 000 pieds) de profondeur pour la houille [550 mètres (1 650 pieds) dans le cas du lignite]. Le service géologique des États-Unis d'Amérique [4] a réexaminé les données de la Conférence de l'énergie et, sur la base de la définition ci-dessus, le chiffre le plus approché qui puisse être avancé pour les réserves de charbon est de l'ordre de 6 000 milliards de tonnes. Dans ce chiffre ne sont pas comprises les réserves non découvertes.

Une importante proportion de la houille contenue dans le sous-sol ne pourra sans doute jamais être extraite par suite de l'existence de failles, d'importantes poches d'eau souterraines, de la nécessité de laisser du charbon pour empêcher les affaissements et des méthodes d'extraction peu économiques. De plus l'intérêt que présente l'extraction des charbons les moins accessibles et de qualité inférieure varie beaucoup d'un bassin minier à l'autre, suivant qu'il existe des ressources d'autre nature à des prix plus ou moins élevés. Le pourcentage moyen d'extraction aux États-Unis d'Amérique n'est guère que de 50 pour cent et, dans certains des bassins de l'ouest les plus éloignés, il ne dépasse pas environ 15 pour cent*. Dans les exploi-

* M. Putnam a proposé de diviser par 10 les estimations primitives des réserves de charbon américain, et le chiffre qu'il avance pour les réserves mondiales de charbon dont l'exploitation est rentable (à des coûts de production ne dépassant pas le double de ceux de 1950) est de 1 000 à 1 200 milliards de tonnes. Cette diminution semble toutefois excessive. Par exemple, elle suppose que les États-Unis d'Amérique ne pourront extraire le charbon dans les gisements situés à plus de 1 500 pieds (500 mètres) de profondeur, ou qui auraient moins de 28 pouces (70 cm) d'épaisseur, ou encore qui auraient une teneur en cendres de 30 pour cent. Or, la profondeur moyenne des mines aux Pays-Bas, dans la Sarre, en Belgique et dans la Ruhr dépasse déjà 500 mètres, une proportion importante du charbon se trouve dans des veines ayant moins de 70 cm d'épaisseur, et certaines de leurs centrales brûlent du charbon donnant plus de 30 pour cent de cendres. Notons encore qu'en Europe on trouve que la production du charbon est économiquement avantageuse alors même que le prix de revient moyen est deux fois plus élevé qu'aux États-Unis. Des estimations moins pessimistes des réserves de charbon techniquement et commercialement exploitables ont été faites par Werner Hagen (*Vorkommen von Kohle, Eisen, Erdol und Uran auf der Welt*, Gluckauf, Essen, 2 janvier 1954) : 1 907 milliards de tonnes de houille grasse et 775 milliards de tonnes d'anthracite et de lignite. Louis C. Mc. Cabe (*Les sources et la consommation d'énergie dans le monde*, document n° 2 du thème de discussion de l'Unesco : « L'énergie au service de l'homme », UNESCO/NS/75, Paris, 11 juillet 1951) a estimé à 3 100 milliards de tonnes d'équivalent de charbon le total des réserves de charbon et de lignite.

tations européennes, l'extraction atteint environ 75 pour cent. Compte tenu de la possibilité de découvrir de nouveaux gisements, il ne semble pas déraisonnable d'arrondir à 3 000 milliards de tonnes l'ordre de grandeur des réserves de combustibles solides qui pourront être extraites en fin de compte. Mais il convient de se rappeler qu'il ne peut y avoir d'estimation exacte; les facteurs décisifs sont l'existence d'autres combustibles et le coût d'extraction du charbon par rapport à celui des autres sources d'énergie possibles.

Pétrole et gaz naturel

Les réserves de pétrole sont bien plus difficiles à situer et à évaluer que celles de charbon et c'est en partie pour cette raison que les réserves de pétrole reconnues sont beaucoup plus faibles par rapport à la production courante. Comme les techniques n'ont cessé de s'améliorer, le nombre des années pour lesquelles on peut être certain de disposer de réserves de pétrole n'a pas diminué, et s'est même accru au cours des vingt ou trente dernières années. Il est maintenant d'environ 30 ans [5] et le fait que l'industrie ait pu parvenir à un tel résultat malgré un accroissement très rapide de la production permet de croire qu'elle pourra maintenir ce rythme.

Cette version moderne de l'histoire biblique de l'huile de la veuve de Sarepta ne saurait toutefois être éternelle. Un certain nombre d'experts se sont risqués à faire une estimation de la réserve exploitable et ont suivi à cet effet la méthode ci-dessous : ils ont évalué en premier lieu la totalité des réserves des États-Unis d'Amérique, au sujet desquelles les renseignements sont les plus complets, puis ils ont rapporté ce chiffre au volume total des sédiments existant aux États-Unis et dans le reste du monde, et que l'on peut considérer comme pétrolifères. Les diverses estimations établies de cette manière [6 *a*, 6 *b*] indiquent toutes que l'ensemble des réserves terrestres, reconnues et non découvertes, doit s'élever à environ 600 milliards de barrels (soit environ 70 milliards de mètres cubes). En outre, on peut compter sur certaines réserves se trouvant sur les plateaux continentaux, qui ont été estimées [6 *a*] au total à 1 000 milliards de barrels, mais dont on ne pourra probablement exploiter qu'une partie. Un certain nombre d'auteurs ont accepté, comme chiffres ronds, pour le total des réserves mondiales, 1 000 milliards de barrels, soit l'équivalent thermique de 200 milliards de tonnes de charbon*.

Le moyen le plus commode (encore que très incertain) d'estimer les réserves totales de gaz naturel est de se référer à la proportion de gaz naturel extrait des gisements pétrolifères en même temps que le pétrole, puisque le gaz naturel est en majeure partie, mais non pas en totalité, un produit d'accompagnement du pétrole. On a estimé [7] qu'aux États-Unis d'Amérique environ 115 mètres cubes de gaz (4 100 pieds cubiques) sont produits par barrel (environ 160 l) de pétrole, et il est probable, à mesure que les forages seront plus profonds et que l'on recherchera le gaz lui-même, que le rapport s'élèvera à l'avenir jusqu'à 170 mètres cubes (6 000 pieds cubiques) par barrel. Les réserves de gaz auraient donc ainsi la même valeur thermique que celles de pétrole, et plusieurs auteurs le confirment**. Mais même aux États-Unis, il est difficile d'éviter une certaine déperdition de ce gaz et il est particulièrement difficile d'exploiter à fond les réserves situées dans les régions écartées du monde, où il n'existe pas sur place de débouché potentiel pour le gaz.

Nous avons donc adopté pour l'ensemble du pétrole et du gaz le chiffre de 300 milliards de tonnes d'équivalent de charbon. Mais, bien que les estimations récentes montrent que c'est là le chiffre le plus raisonnable, on ne saurait le considérer comme précis. Il a en effet été établi dans l'hypothèse que les réserves situées dans certaines des régions les plus isolées du monde pourront être exploitées avec une intensité analogue à celle que l'on note aux États-Unis. Il suppose également une amélioration continue du pourcentage de récupération. Le fait qu'à l'heure actuelle ce pourcentage varie entre 10 pour cent environ et près de 100 pour cent illustre dans quelle mesure les réserves sont fonction de la technique et des conditions économiques.

Schistes pétrolifères et sables bitumineux

On trouve un peu partout des schistes pétrolifères et des sables bitumineux, mais le coût élevé de l'extraction et du raffinage et la très forte proportion de cendres résiduelles font qu'on ne les a guère utilisés. Il existe toutefois de petites exploitations de schistes pétrolifères dans un certain nombre de pays, et les gisements les plus prometteurs des États-Unis d'Amérique sont presque susceptibles d'être exploités commercialement même au prix relatif actuel du pétrole brut. On ne connaît pas le volume total de ces réserves, mais il semble que leur teneur totale en pétrole soit comparable aux réserves de pétrole proprement dit. Toutefois, le coût d'exploitation est si élevé que la plupart des auteurs réduisent très sensiblement le volume

---

* Dans certains ouvrages plus récents [voir par exemple le « Report to the National Petroleum Council of the McCullum Committee on Oil and Gas Availability», *Petroleum productive capacity*, 1952, et Eugene Ayres, *The long range outlook for liquid fuels in America*, Proc. American Power Conference, 1953] on a considéré que les estimations des réserves américaines, selon lesquelles les États-Unis atteindront bientôt leur production maximum, étaient trop faibles. D'autre part, une estimation faite par G. M. Lees et D. C. Ion (*The distribution of the oil reserves of the world*, Journal Institute of Petroleum, vol. 34, 1952) est plus prudente quant aux possibilités pratiques d'extraire du pétrole des plateaux continentaux, et déduction faite du pétrole déjà extrait, le volume en est estimé à l'équivalent d'un peu moins de 150 milliards de tonnes de charbon.

** Par exemple, Lees et Ion, *op. cit.*

des réserves exploitables. Un auteur * a supposé, et c'est là une évaluation raisonnable, que le pétrole que l'on pourrait retirer des schistes et des sables bitumineux équivaut à quelque 150 milliards de tonnes de charbon.

Énergie hydraulique

L'homme ne peut utiliser qu'une fraction de l'énergie hydraulique totale théorique des fleuves du monde [8]. Les meilleures estimations de la puissance hydraulique potentielle totale (aménagements existants compris) fixent sa valeur à environ 500 millions de kilowatts mesurés en basses eaux**. Dans les centrales en service, la puissance développée est ordinairement de 2 à 4 fois plus élevée que la puissance nominale en période de basses eaux; elle peut même atteindre 10 fois cette valeur. On obtient une évaluation raisonnable de l'énergie totale qui pourrait être produite en multipliant par trois la puissance nominale en basses eaux et en admettant qu'elle est utilisée à 100 pour cent pendant la moitié de l'année. Ceci donne une estimation de 7 000 milliards de kWh par an, qui pourraient être produits, avec le rendement moyen actuel, par environ 4 milliards de tonnes de charbon dans les centrales thermiques, ou par environ 2 milliards et demi de tonnes de charbon avec le rendement qui pourra être atteint après l'an 2000. Comme il n'est pas économique de transporter l'électricité à grande distance, l'exploitation intégrale de cette puissance dépendra de la création d'industries dans les régions isolées du monde (par exemple au Congo belge et au Congo français) où se trouve une grande partie de ces ressources en énergie. Mais la tendance à l'envasement des bassins de retenue est un facteur dont il faut tenir compte [9]. Dans l'hypothèse la plus optimiste, et en l'absence d'énergie nucléaire, le nombre de kWh produits augmentera au rythme de 4 pour cent par an, si bien que vers l'an 2000, l'économie de charbon sera de près de 1 milliard de tonnes par an.

Réserves totales de combustibles classiques

Les réserves mondiales des différentes sources classiques d'énergie sont donc évaluées comme suit :

Tableau 4

Réserves utilisables d'énergie dans le monde
(En milliards de tonnes d'équivalent de charbon)

Charbon et lignite	3 000
Pétrole et gaz	300
Schistes pétrolifères et sables bitumineux .	150
A quoi il faut ajouter :	
Énergie hydraulique	2,5 par an

*Évaluation de McCabe (1951).

**C'est-à-dire le débit disponible pendant 95 pour cent du temps, sans tenir compte de la retenue. U. S. Geological Survey, *Developed and potential water power of the world*, Circular No. 329, Washington, 1954.

LA DEMANDE D'ÉLECTRICITÉ

Lorsqu'il sera devenu moins onéreux de produire de l'électricité à partir de l'énergie nucléaire que des combustibles classiques, l'un des principaux facteurs qui détermineront le rythme du progrès sera l'importance de la capacité de production d'électricité qui sera alors nécessaire.

Accroissement de la production

La production d'électricité dans le monde s'élevait, au début de ce siècle, à environ 9 milliards de kilowattheures par an. Actuellement elle atteint presque 1 500 milliards de kilowattheures par an, le taux d'accroissement ayant été en moyenne d'environ 10 pour cent par an. Cette rapide augmentation s'est manifestée dans tous les pays [10]. Bien que l'accroissement soit légèrement plus rapide au début qu'il ne l'est ensuite et que la consommation par habitant prenne des valeurs très diverses, il est frappant de constater qu'en Europe et aux États-Unis, où cette consommation est respectivement deux et six fois plus élevée que sa moyenne dans le monde, on ne constate aucun symptôme de saturation. Au contraire, le taux d'accroissement en Europe et aux États-Unis d'Amérique depuis la guerre a été en moyenne supérieur à 10 pour cent par an.

La demande future d'électricité

La figure 4 montre que la production mondiale d'électricité peut être représentée par une courbe assez continue, le taux d'accroissement diminuant légèrement, mais de façon régulière. L'équation $E = 1\,130 \left(\frac{t - 1\,875}{77}\right)^{4,3}$ milliards de KWh, selon laquelle le taux d'accroissement à un moment quelconque est inversement proportionnel au nombre d'années qui se sont écoulées depuis 1875, représente cette courbe avec une si bonne approximation qu'on peut l'utiliser avec confiance pour évaluer le niveau probable de la demande d'électricité dans l'avenir.

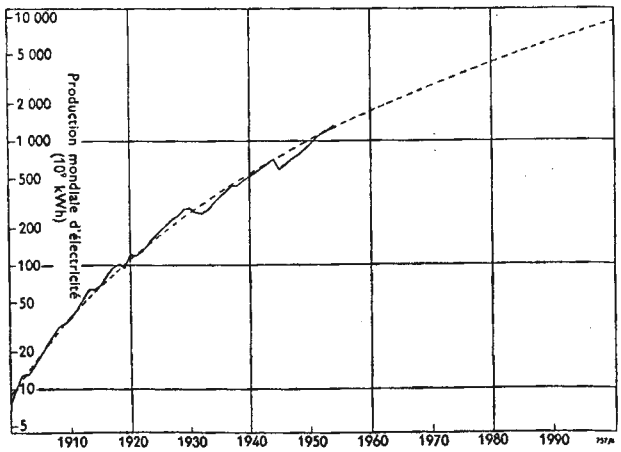


Figure 4. — Production de l'électricité de 1900 à 1954.

Étant donné que les rendements des centrales thermiques se rapprochent des limites fixées par la thermodynamique, il n'est pas possible d'escompter que l'amélioration du rendement puisse à l'avenir abaisser le prix réel de l'énergie électrique dans une proportion aussi importante que par le passé [11]. Il est peu probable, cependant, que la demande s'en trouve notablement affectée. Les estimations déjà publiées de l'accroissement de la production d'électricité prévu aux États-Unis d'Amérique, en U.R.S.S. et dans le Royaume-Uni, font apparaître une augmentation incessante de la demande, et il paraît raisonnable de prévoir que cette augmentation se manifestera selon la courbe de la figure 4, jusqu'à ce que le chiffre de 9 000 milliards de kilowatt-heures (y compris la production hydraulique) soit atteint vers la fin du siècle. Si à cette époque le rendement thermique moyen a atteint la valeur de 33 pour cent, la production mondiale d'énergie électrique représentera à elle seule l'équivalent de 3,5 milliards de tonnes de charbon par an.

NÉCESSITÉ DE DISPOSER D'UNE NOUVELLE SOURCE D'ÉNERGIE

Peut-on conclure de ce qui précède à la nécessité de disposer d'une nouvelle source d'énergie? En ce qui concerne les besoins globaux et les ressources totales, nous avons vu que :

1) La demande totale d'énergie commerciale augmentera probablement, du moins pendant un certain temps, à un taux qui ne semble pas devoir être inférieur à 2 pour cent par an et qui sera peut-être supérieur à ce chiffre. La quantité d'énergie consommée en l'an 2000 représentera probablement au moins l'équivalent de 7,5 milliards de tonnes de charbon par an, contre 2,75 milliards en 1950;

2) A moins que l'énergie nucléaire n'offre des avantages économiques supérieurs à l'énergie hydraulique, celle-ci fournira peut-être l'équivalent de presque 1 milliard de tonnes de charbon par an en l'an 2000, et plus tard, l'équivalent d'environ 2,5 milliards de tonnes;

3) Les données dont nous disposons actuellement permettent de conclure que les réserves exploitables de combustibles solides et liquides et de gaz naturel sont de l'ordre de 3 500 milliards de tonnes au total. Il convient de souligner à ce propos que les réserves exploitables sont fonction de la demande de combustible et des techniques de prospection et d'extraction.

Si la demande totale de combustibles primaires continuait à s'accroître de 2 pour cent par an comme elle le fait depuis longtemps et si aucun apport nouveau ne parvenait soit de l'énergie nucléaire, soit d'autres sources encore inconnues, les réserves de combustible solide, de combustible liquide et de gaz naturel ne suffiraient plus, en 2025, que pendant 300 années environ, au taux qui serait alors celui de la consommation. Pour un accroissement de la demande de 3 pour cent par an, elles ne suffiraient plus alors que pendant 120 années au même taux de consommation. Si l'expansion de la demande se poursuivait à raison de 2 pour cent par an jusqu'en 2050 (ce qui impliquerait une consommation totale par habitant environ quatre fois plus élevée qu'en 1950), les réserves subsistantes représenteraient environ 150 années de consommation; pour un accroissement de 3 pour cent, elles seraient épuisées en moins de 40 ans. De nombreux pays auraient été contraints bien avant cela d'imposer des restrictions à la consommation.

La nécessité de compléter au moyen d'une source nouvelle les sources d'énergie actuellement exploitées est cependant beaucoup plus urgente que ne le laisserait croire le calcul de la demande et des réserves potentielles globales. L'expérience a montré, dans certains pays au moins, qu'il devient de plus en plus difficile d'attirer les travailleurs vers le métier de mineur, et la difficulté ne fera sans doute que croître à mesure que les niveaux de vie s'élèveront. De toute l'énergie produite dans le monde en 1950 (cf. tableau 1), 57 pour cent environ provenait du charbon. Or la production de charbon dans le monde n'augmente que d'environ 0,5 pour cent par an; dans l'hypothèse où il serait impossible d'accélérer cette augmentation, le monde ne disposerait, aux environs de l'an 2000, que de 2 milliards de tonnes de charbon par an, en regard de l'équivalent d'environ 7,5 milliards de tonnes alors nécessaires à une consommation qui se serait accrue au taux composé de 2 pour cent. En l'absence d'énergie nucléaire, il se peut que l'énergie hydraulique apporte, comme j'ai essayé de le montrer,

Tableau 5

Demande d'énergie à laquelle devraient éventuellement satisfaire les sources classiques en l'absence d'une source nouvelle

(En milliards de tonnes d'équivalent de charbon)

	Énergie totale	Charbon	Énergie hydraulique	Pétrole et gaz naturel [a]
1950 . .	2,8	1,6	0,2	1,0
2000 . .	7,4	2,0	0,9	4,5
2025 . .	12,1	2,3	2,2	7,6

[a] Y compris le pétrole tiré des schistes et des sables bitumineux.

N. B. — Les chiffres indiqués dans le tableau ci-dessus ont été calculés à partir des hypothèses suivantes :

1) la demande totale d'énergie s'accroît de 2 pour cent par an (taux composé);

2) la quantité totale de charbon extrait s'accroît de 0,5 pour cent par an (taux composé);

3) la quantité d'énergie hydraulique produite s'accroît de 4 pour cent par an (taux composé), économisant ainsi la consommation de charbon dans les centrales thermiques dont le rendement thermique moyen est supposé être de 21 pour cent en 1950, de 33 pour cent en 2000 et de 35 pour cent en 2025.

un complément équivalent sensiblement à 1 milliard de tonnes de charbon par an, ce qui laisserait chaque année 4,5 milliards de tonnes à la charge du pétrole et du gaz naturel. Selon un calcul analogue fait pour 2025, ce sont 7,5 milliards de tonnes d'équivalent de charbon que ces deux derniers combustibles devraient alors fournir. Les réserves de pétrole et de gaz se trouveraient réduites à environ 70 années d'utilisation au taux de consommation de l'an 2000, et à 23 années environ au taux de consommation de 2025. On voit aussitôt combien il serait difficile de faire face à la demande de ces deux combustibles. En de telles circonstances, l'industrie charbonnière prendrait sans doute une extension plus rapide sous la poussée d'une impérieuse nécessité — mais celle-ci ne contribuerait pas moins à stimuler la production d'énergie nucléaire.

La demande d'électricité favorisera l'accroissement rapide de la production d'énergie nucléaire. Aux environs de l'an 2000, le monde peut avoir besoin d'environ 9 000 milliards de kilowattheures par an; or, pour produire cette énergie uniquement dans des centrales thermiques, il faudrait brûler environ 3,5 milliards de tonnes de charbon, soit presque la moitié de la quantité de combustible primaire dont l'utilisation est prévue (voir plus haut). Même si l'on admet une importante contribution de l'énergie hydraulique, une telle consommation dans les centrales thermiques dépasserait sans doute la production totale de charbon, à moins que l'extraction ne s'accélère à un rythme plus rapide qu'il n'est prévue. A en juger par les chiffres reproduits dans l'appendice, le prix réel du charbon à la fin du siècle ne sera pas inférieur à 1,5 fois son prix actuel. Il est probable qu'à cette époque il sera devenu indispensable d'extraire des quantités appréciables de pétrole des schistes, des sables bitumineux ou de la houille et la perspective de devoir affecter des quantités massives de pétrole et de gaz à la production d'électricité n'est nullement attrayante. Ceci m'amène donc à poser la question suivante : est-il raisonnable d'escompter que, vers la fin du siècle, il sera vraiment possible de faire face à la plus grande partie de la demande totale en électricité — représentant par exemple l'équivalent de 2 à 3 milliards de tonnes de charbon par an — en faisant appel à l'énergie nucléaire ?

J'hésite beaucoup à écrire ces chiffres. L'extrapolation de courbes d'intérêt composé peut donner des résultats d'une surprenante absurdité au bout d'un nombre d'années remarquablement bref et les évaluations des réserves comportent une forte marge d'erreur. L'accroissement de 2 pour cent dans l'utilisation totale des combustibles primaires se maintient cependant depuis une centaine d'années, et rien, à l'exception du taux d'accroissement démographique d'un petit nombre de pays, ne permet de dire que la tendance doive se renverser. Il serait aisé d'avancer des chiffres qui produiraient un effet de surprise plus vif encore. Une extrapolation linéaire des taux d'accroissement de la production industrielle dans le monde au cours des quelques dernières années permettrait, d'après la relation établie antérieurement entre la production industrielle et la consommation d'énergie, de conclure à un accroissement annuel de la consommation mondiale d'énergie supérieur à 4 pour cent. Il n'est d'ailleurs pas impossible que l'on arrive à un tel chiffre pendant une période assez brève. Cependant, nous sommes finalement amenés à nous demander — comme chaque fois que l'on constate un taux d'accroissement très rapide — si nous pouvons vraiment nous représenter un monde dans lequel la consommation moyenne d'énergie par habitant serait environ trente fois supérieure à sa valeur actuelle (ce qui serait le cas en 2050 avec un tel taux d'accroissement) et continuerait encore à augmenter rapidement. Il me semble plus indiqué d'estimer qu'en fin de compte la demande d'énergie pourra effectivement être satisfaite et que la courbe d'expansion des pays les plus riches finira par s'aplanir. De cette façon, il serait plus réaliste de supposer un taux d'accroissement plus lent pour l'ensemble du monde.

Il saute aux yeux, semble-t-il, que même si nous évaluons avec prudence le développement de l'économie et l'accroissement futur de la demande en énergie, le moment n'est pas éloigné, si nous prenons pour unités de temps celles dont on se sert pour écrire l'histoire des nations, et même la vie des individus, où le monde devra faire face à de graves problèmes posés par la raréfaction des combustibles, à moins qu'une source nouvelle ne puisse être exploitée. Les remarquables progrès matériels accomplis par l'humanité depuis deux siècles ont été surtout provoqués par les possibilités de multiplier l'effort musculaire de l'homme et de l'animal grâce à des formes d'énergie nouvelles qu'offrirent en premier lieu le charbon et la vapeur, et plus récemment le pétrole et l'énergie hydraulique. La richesse des nations les plus opulentes provient du fait qu'elles utilisent beaucoup plus de puissance mécanique par travailleur que les autres. Aux États-Unis d'Amérique, la quantité d'énergie d'origine thermique et hydraulique est, par habitant, environ dix fois plus grande que dans certains des pays les plus pauvres d'Europe, et environ cent fois plus grande que dans certains des pays les plus pauvres de l'Orient. Pour assurer le développement économique des peuples qui sont actuellement pauvres en énergie, il s'agit surtout d'ajouter des chevaux-vapeur à ceux dont ces peuples disposent déjà. La fantastique marche au progrès que l'humanité a inscrite à son actif dans les deux siècles passés ne doit pas être suivie au cours des deux siècles à venir d'un recul occasionné par l'épuisement de ces mêmes combustibles qui ont été à son origine; il n'est pas de tâche plus importante que d'y veiller.

Appendice

LE PRIX DE REVIENT DES SOURCES CLASSIQUES D'ÉNERGIE

Certaines des différences qui apparaissent sur les courbes de la figure 1 entre les taux d'accroissement de l'utilisation des principaux combustibles s'expliquent par les changements survenus au cours des vingt dernières années dans leurs coûts de production. Ces changements soulignent également le besoin d'une nouvelle source d'énergie.

Charbon

Le tableau 1 indique les variations du prix à la mine du charbon dans un certain nombre de pays, rapportées à celles de l'indice des prix de gros dans ces mêmes pays.

Tableau 1

Variations des prix relatifs du charbon

(1937 = 1,00)

	États-Unis d'Amérique	Royaume-Uni	France	Belgique	Ruhr (houille de chaudière)
1913 . .	0,78	0,87	0,78	0,87	0,90
1924 . .	1,10	0,97	0,80	0,96	1,13
1937 . .	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1946 . .	1,26	1,54	1,23	0,80	. . .
1953 . .	1,22	1,29	1,33	1,11 [a]	1,30

[a] 1952.

N. B. — Les valeurs du tableau ci-dessus ont été obtenues en divisant : *a*) les chiffres exprimant les variations moyennes du prix à la mine de la tonne de charbon, cités par le *Minerals Yearbook* des États-Unis d'Amérique, les *Statistical Digests* du Ministère britannique des combustibles et de l'énergie, la *Statistique de l'Industrie minérale* du Bureau français de documentation minière, les *Annales des Mines de Belgique*, le *Statistische Übersicht über die Kohlenwirtschaft* et la *Kohlenwirtschaft der Welt in Zahlen*, par : *b*) les indices des prix de gros tirés des *Annuaires Statistiques* mensuels et des *Bulletins de statistique* de la S. D. N. et de l'O. N. U.

Les imperfections de ces diverses sources, et surtout celles des indices des prix de gros (qui ont dû être établis en associant un certain nombre d'indices valables chacun pour une période différente) ne permettent de tirer du tableau 1 que des conclusions très générales. Il est néanmoins frappant de constater que le prix réel du charbon semble avoir augmenté dans chaque pays. L'augmentation a été d'environ 50 pour cent pendant la première moitié du XX[e] siècle, constatation d'autant plus surprenante lorsque l'on considère qu'une grande partie de la production charbonnière mondiale se vend aujourd'hui à un prix à peine supérieur au prix de production. Putnam [12] cite des évaluations de Colin Clark qui confirment cette conclusion. On peut s'attendre à ce que la tendance à la hausse du prix réel du charbon se maintienne à l'avenir.

Pétrole et gaz naturel

Le tableau 2 montre qu'au contraire du charbon, il ne s'est produit que très peu de changement pendant la première moitié de ce siècle dans le prix réel du pétrole brut aux États-Unis d'Amérique, alors que le prix réel du mazout et du gaz naturel a baissé.

Tableau 2

Variations des prix relatifs du pétrole et du gaz naturel

(1937 = 1,00)

	Pétrole brut	Mazout			Gaz naturel
	États-Unis	États-Unis	Royaume-Uni	France	États-Unis
1913 . .	1,00	—	1,54	—	—
1924 . .	1,06	1,37 [a]	1,12	—	1,60
1937 . .	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1946 . .	0,85	0,97	1,11	—	0,72
1953 . .	1,07	0,99	0,95	0,85 [b]	0,80

[a] 1925. [b] 1952.

N. B. — Les valeurs du tableau ci-dessus ont été obtenues en divisant : *a*) les chiffres exprimant les variations moyennes du prix, au lieu de production, du pétrole brut et du gaz naturel aux États-Unis d'Amérique selon les *Minerals Yearbooks* des États-Unis d'Amérique, les prix moyens du mazout à l'importation au Royaume-Uni et en France selon les statistiques du commerce, et le prix f.o.b. du mazout dans la région du Golfe du Mexique selon les *Platts Yearbooks*, par : *b*) les indices des prix de gros des pays cités au tableau 1.

La conséquence de ces changements a été que le prix à la tonne du mazout aux principaux ports d'Europe occidentale et des États-Unis d'Amérique est actuellement deux fois plus élevé en moyenne que le prix du charbon à la mine. Étant donné que, dans une tonne de mazout, le consommateur trouve, sous forme de pouvoir calorifique et d'économie dans l'utilisation, des avantages qui justifient (suivant le mode d'utilisation choisi) un prix de 1,5 à 3 fois supérieur à celui du charbon, le mazout livre une vive concurrence au charbon dans certaines des principales régions industrielles du monde. D'autre part, les produits de distillation du pétrole prennent nettement l'avantage sur le charbon lorsqu'il s'agit de les transporter par mer, par terre ou par air. Quant au gaz naturel, les consommateurs qui sont assez peu éloignés de ses sources peuvent l'acheter à des prix très bas par comparaison au prix d'autres combustibles. C'est ainsi que dans le bassin du Sud-Ouest des États-Unis d'Amérique, son prix n'atteint pas la moitié de celui du pétrole pour un même nombre d'unités thermiques [13], et qu'il lui est comparable en Italie et dans d'autres régions de production d'Europe.

Électricité

La production d'électricité s'est surtout développée parce que le prix de l'énergie électrique a énormément baissé par rapport à d'autres prix et

au coût de la main-d'œuvre humaine. Les chiffres ci-dessous, donnés pour quelques pays, montrent la variation du prix unitaire moyen de l'électricité par rapport aux variations des prix de gros.

Tableau 3

Estimation des variations du prix relatif de l'électricité

(1937 = 1,00)

	États-Unis d'Amérique	Royaume-Uni	France (Paris)	Belgique
1913 . .	1,7	2,2	...	2,0
1924 . .	1,1	1,3	0,9	0,7
1937 . .	1,0	1,0	1,0	1,0
1946 . .	0,6	0,7	0,4	0,5
1953 . .	0,4	0,4	0,4[a]	0,6[a]

[a] 1952.

N. B. — Les valeurs du tableau ci-dessus ont été obtenues en divisant : *a*) les chiffres exprimant les variations du prix de vente moyen de l'unité d'énergie électrique, selon les *Statistical Digests* du Ministère britannique des combustibles et les renseignements rassemblés par l'OECE, par : *b*) les indices des prix de gros cités au tableau 1.

Le contraste est frappant entre la chute des prix réels de l'électricité, la stabilité des prix du pétrole et la hausse des prix du charbon que font ressortir les tableaux 1 et 2. Une comparaison avec la variation des salaires horaires montre également à quel point il est devenu avantageux d'économiser la main-d'œuvre en la remplaçant par de l'énergie électrique. C'est ainsi qu'au Royaume-Uni, avant la première guerre mondiale, le coût du cheval-heure d'énergie fourni par un travailleur humain non qualifié équivalait à peu près à celui de 60 chevaux-heures d'énergie électrique. De nos jours, un cheval-heure d'énergie, obtenu par le travail humain coûte à peu près autant que 450 chevaux-heures d'énergie électrique.

Énergie hydraulique

Bien que les investissements soient en général (mais pas dans tous les cas) plus élevés pour une centrale hydraulique que pour une centrale thermique de même puissance, et bien qu'à cet égard il y ait de notables différences d'une usine à une autre, le prix de revient du kilowattheure fourni par une centrale hydraulique est actuellement en moyenne sensiblement inférieur à celui que produit une centrale thermique. Il semblerait au premier abord que l'industrie hydraulique soit soumise à la loi des profits décroissants, étant donné que les sites les plus intéressants sont sans doute ceux que l'on a équipés les premiers. Toutefois, diverses études ont montré que le progrès des techniques de construction a jusqu'ici fait largement échec à cette loi [14,15]. Il se peut qu'à la longue, les progrès techniques ne suffisent plus à compenser les désavantages naturels des sites qu'il sera nécessaire d'équiper, l'un après l'autre, si l'on veut exploiter toutes les ressources en énergie du monde, mais on peut tenir pour probable que le coût de l'énergie hydraulique continuera d'être suffisamment inférieur à celui de l'énergie produite dans les centrales thermiques pour justifier l'exploitation toujours croissante des ressources hydrauliques, jusqu'à ce que les centrales nucléaires viennent offrir une solution de remplacement encore plus intéressante.

BIBLIOGRAPHIE

1. Nations Unies, *National and per capita incomes, seventy countries, 1949*, Études statistiques, 1951, série E, n° 1.
2. Commission Paley, *Resources for freedom*, Rapport de la Materials Policy Commission au Président des États-Unis d'Amérique, United States Government Printing Office, 1952, Washington.
3. Putnam P. C., *Energy in the future*, D. van Nostrand Co. Inc., 1954, p. 445, New York.
4. Averitt Paul et Berryhill Louise, *Coal reserves of the United States*, U.S. Geological survey circular 94, 1950.
5. World Oil, janvier 1955.

6*a* Pratt Wallace E., *Oil in the earth*, University of Kansas Press, 1943.

b Pogue J. E., *Oil in the world*, Yale Review, 1946, n° 5, 35. Weeks L. G., *Highlights on 1947 developments in foreign petroleum fields*, Bull. Am. Assoc. Petroleum Geology, juin 1948, vol. 32, n° 6. Weeks L. G., Examen du document de A. I. Levorsen, *Évaluation des réserves de pétrole non repérées*, Conférence scientifique des Nations Unies pour la conservation et l'utilisation des ressources naturelles, 1949, vol. I.

7. Terry L. F., *The future supply of gas*, 29 novembre 1950.
8. Ayres et Scarlott, *Energy sources—The wealth of the world*, 1952, chapitre 17, McCraw Hill.
9. Hartley Sir Harold, *The engineer's contribution to the conservation of natural resources*, The first Graham Clark Lecture, Institute of Civil Engineers, mai 1955.
10. Kopeliowitch J., *The growth of electricity production and some consideration on the problem of meeting the future demand*, Conférence internationale des grands réseaux électriques à haute tension, 1948, p. 313.
11. Voir l'appendice et aussi *The price of electricity*, OECE, Paris, 1954, p. 27.
12. Putnam P. C., *op. cit.* p. 137 à 141.
13. Commission Paley, *Resources for freedom*, Rapport de la President's Material Policy Commission, 1952, vol. 3, p. 18.
14. CEE, *Le potentiel hydroélectrique de l'Europe*, ses limites matérielles, techniques et économiques, 1953.
15. Wolfender, *Le rendement décroissant des aménagements hydroélectriques*, Revue française de l'énergie, janvier 1955.

Besoins en énergie et développement économique

par E. S. Mason * et le personnel du Peacetime Atomic Energy Project **

Grâce à l'énergie atomique, le monde dispose, de toute évidence, d'une nouvelle source de puissance. Dans quelle mesure cette nouvelle source, remplacera-t-elle, au cours des prochaines décennies, les sources d'énergie classiques? Cela dépendra avant tout de son prix de revient, comparé à celui de l'énergie classique, qui dépendra à son tour de la rapidité de l'accroissement des besoins par rapport aux quantités d'énergie disponibles. Nous insistons bien sur le fait qu'il s'agit ici de « l'énergie de source classique » et de « son évolution en cours des prochaines décennies ».

Avec de l'imagination, en effet, toute discussion sur l'utilisation future de l'énergie atomique fait apparaître une multitude de possibilités. Si nous envisageons d'explorer d'autres planètes avec des engins astronautiques mus par l'énergie atomique, ou de descendre dans les profondeurs des océans avec un futur capitaine Nemo dans un sous-marin atomique, les perspectives les plus hardies semblent s'ouvrir devant nous. Mais nous voulons ici laisser systématiquement de côté toute imagination et nous occuper avant tout des effets que l'énergie nucléaire aura sur les disponibilités et le coût de la production des centrales d'énergie.

La période envisagée a aussi son importance. Ce que nous savons des réserves mondiales de combustible classique nous permet, en effet, de présumer qu'au cours des prochaines dizaines d'années les besoins du monde en énergie, quel que soit leur taux d'accroissement, pourront être satisfaits par les sources d'énergie classique, à un prix qui sera sans doute amené à augmenter, mais dans de faibles proportions. En revanche, si l'on envisage des périodes plus longues, la situation risque d'être très différente, et l'on peut admettre qu'à la longue l'énergie nucléaire deviendra la condition *sine qua non* du maintien de la prospérité économique du monde.

La question qui nous intéresse ici est donc de savoir dans quelle mesure l'existence de centrales d'énergie atomique influera, au cours des vingt-cinq ou cinquante prochaines années, sur la prospérité économique des diverses parties du monde. S'il est permis de supposer que l'utilisation de l'énergie nucléaire permettra d'abaisser le prix de l'énergie dans les régions où celui-ci est élevé et de freiner la tendance à la hausse dans les régions où ce prix est encore assez bas, quelles conséquences en découleront alors pour le développement économique, la localisation des centres d'activités économiques et l'afflux de ressources et de produits sur le marché international? Pour répondre à ces questions, il faut évidemment entrer dans le domaine de la spéculation. Toutefois, certaines précisions peuvent nous être données par l'examen des chiffres qui illustrent, pour le passé, la corrélation entre le développement économique et la consommation d'énergie, les variations du coût de l'énergie résultant de situations géographiques différentes, et la mesure dans laquelle le facteur énergie intervient dans le coût de la production.

La première partie de cet exposé examine brièvement le problème de l'estimation des besoins en énergie. La deuxième partie est consacrée au problème des rapports complexes existant entre le développement économique et la consommation d'énergie. La troisième fait intervenir la notion du coût de production et montre comment, suivant les régions et les époques, des différences dans les disponibilités et dans le prix de l'énergie ont influé sur la nature et le rythme du développement économique. La quatrième partie de cet exposé étudie dans leurs grandes lignes quelques-uns des effets qui découleront d'une modification des besoins et des disponibilités en énergie, modification à laquelle il y a tout lieu de s'attendre.

ESTIMATION DES BESOINS EN ÉNERGIE

Il est bien évident qu'il existe une corrélation étroite entre la consommation d'énergie et le développement économique, et la deuxième partie de cette étude expose quelques-uns des principaux aspects de cette corrélation. Pour évaluer les besoins futurs en énergie, il convient donc de commencer par examiner quelles sont les possibilités offertes au développement économique, et pour prévoir les besoins en énergie en se référant aux expériences faites antérieurement, il faut évidemment supposer que l'évolution économique

---

Original : anglais.

* Harvard University, Cambridge, Massachusetts.

** National Planning Association, Washington, D. C.

Les auteurs tiennent à exprimer leur reconnaissance à MM. Harold J. Barnett et Joseph Lerner de la société « Resources for the Future, Inc. », pour leur concours lors de la préparation de cette étude.

se poursuivra à peu près au même rythme que par le passé. Il est inutile d'ajouter que si l'on essaye de prévoir à quel rythme se fera cette évolution dans le monde, on entre dans le domaine de la haute spéculation; néanmoins, ce n'est pas toujours le cas. Dans certaines régions, en effet, si l'on fait abstraction des risques de guerres ou d'autres catastrophes, la consommation d'énergie et son accroissement ont un caractère suffisamment stable pour permettre de prévoir avec assez d'exactitude l'évolution future; et pour d'autres régions, il est au moins possible d'indiquer quelles sont les principales causes d'incertitude.

Un certain nombre de pays dont l'économie industrielle peut être considérée comme « adulte » absorbent, à l'heure actuelle, plus de 60 pour cent de la quantité totale d'énergie consommée dans le monde. Dans ces pays, le taux d'accroissement de la consommation d'énergie se maintient depuis un temps suffisamment long et l'importance relative des différents secteurs de leur économie qui sont les gros consommateurs d'énergie (industries de transformation, transports et industries extractives), est suffisamment stable pour permettre de prévoir avec une certaine probabilité leurs besoins futurs en énergie. Les États-Unis d'Amérique et la plupart des pays de l'Europe occidentale entrent dans cette catégorie, et quelques autres pays encore.

Des études approfondies ont été entreprises aux États-Unis et en Europe occidentale pour prévoir les besoins en énergie; ces études font ressortir nettement un taux d'accroissement de la production nationale brute qui ne diffère pas beaucoup des taux d'accroissement constatés dans le passé alors que, pour des raisons qui seront données ultérieurement, les taux d'accroissement de la consommation d'énergie sont à peu près équivalents ou même un peu inférieurs à ceux de la production nationale brute. La President's Materials Policy Commission a estimé que la consommation d'énergie s'accroîtrait de 3 pour cent environ par an aux États-Unis, entre 1950 et 1975. Pour le monde non soviétique dans son ensemble, ladite Commission, s'appuyant toutefois sur des éléments moins sûrs, a prévu également un accroissement de 3 pour cent. Ce chiffre correspond à un taux inférieur à 3 pour cent pour l'Europe occidentale et supérieur à 3 pour cent pour l'ensemble des pays non soviétiques, en laissant de côté les États-Unis et l'Europe occidentale [1]*.

La Division de l'industrie de la Commission économique pour l'Europe a estimé que les besoins énergétiques de l'Europe occidentale s'accroîtraient de 1 $^1/_4$ pour cent par an seulement entre 1953 et 1963 [2]. P. H. Frankel, qui est un spécialiste des problèmes du pétrole, estime cependant que, sans être trop optimiste, on peut prévoir que la consommation d'énergie s'accroîtra de 2 $^1/_2$ pour cent dans les pays de l'OECE entre 1955 et 1968 [3]. Si l'on tient compte de ces évaluations et d'autres éléments encore, il semble raisonnable d'évaluer à 2 ou 2 $^1/_2$ pour cent par an le taux probable d'accroissement de la consommation de l'énergie fournie par les combustibles classiques dans les pays industriellement évolués.

Un second groupe de pays comprend les pays qui s'industrialisent rapidement. Plusieurs pays de l'Amérique latine entrent dans cette catégorie, l'U.R.S.S. aussi, incontestablement, et peut-être certains autres pays de l'Europe orientale; cette liste n'a d'ailleurs pas la prétention d'être limitative. Selon un document publié par l'Organisation des Nations Unies sur les besoins du monde en énergie, 65 pour cent de l'énergie consommée est absorbée par l'industrie (y compris les industries extractives) et par les transports. Si l'importance relative de ces activités (que nous appelons ici « industries ») augmente dans un pays, le taux d'accroissement de la consommation d'énergie sera nécessairement élevé. Depuis la fin de la deuxième guerre mondiale, le taux d'accroissement de la consommation d'énergie commerciale a été de 7 $^1/_2$ pour cent par an en Amérique latine et, même si l'on tient compte des cas où l'énergie commerciale s'est substituée à l'énergie non commerciale, on constate que la consommation d'énergie en provenance des diverses sources s'est accrue de 5 pour cent par an. Le pourcentage d'accroissement a été nettement plus élevé encore en U.R.S.S.

Dans ce groupe de pays, les prévisions relatives aux besoins en énergie soulèvent deux problèmes principaux : dans quelle mesure la cadence actuelle d'industrialisation rapide est-elle essentiellement liée à un processus de croissance dont la continuité risque de se maintenir ? Et si tel est le cas, pendant combien de temps le développement économique d'un pays sera-t-il caractérisé par un accroissement de l'importance relative du secteur industriel ? Certes, pour plusieurs pays de cette catégorie, nous pouvons admettre que l'industrialisation fait partie intégrante d'un processus de croissance dont l'origine est assez fondée pour qu'on puisse s'assurer qu'il persistera. Dans d'autres pays au contraire, il est possible que le rythme actuel d'industrialisation rapide soit le résultat de circonstances fortuites.

Il ressort des expériences faites par la plupart des pays capitalistes que le secteur industriel ne peut continuer indéfiniment à se développer plus rapidement que les autres secteurs (que ce développement se mesure d'après le nombre de personnes employées ou d'après la valeur de la production). Effectivement, un moment arrive où le secteur industriel se stabilise et où il se produit dans le secteur dit primaire une diminution de production, au profit de ce qu'on appelle le secteur tertiaire. Dans la mesure où cette constatation est exacte, on peut prévoir que les pays actuellement en voie d'industrialisation rapide pourront voir le taux d'accroissement de leurs besoins en énergie diminuer un jour, mais la date à laquelle ce ralentissement

* Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie qui figure à la fin du mémoire.

pourra se produire, dans un pays donné, reste évidemment des plus incertaines.

Il va donc de soi que les prévisions relatives aux besoins d'énergie des pays qui s'industrialisent rapidement, et qui consomment actuellement entre 20 et 25 pour cent environ de l'énergie mondiale, sont sujettes à des risques d'erreurs beaucoup plus grands que les évaluations faites pour les pays du premier groupe. Si l'on nous permet toutefois d'avancer une hypothèse, nous croyons pouvoir énoncer un chiffre légèrement supérieur à 5 pour cent pour la première moitié de la période envisagée et légèrement inférieur à 5 pour cent pour la deuxième moitié.

Il faut ranger dans une troisième catégorie les pays que l'on appelle sous-développés, c'est-à-dire la plupart des pays d'Asie et d'Afrique et quelques pays de l'Amérique latine. Ces pays absorbent à l'heure actuelle de 15 à 20 pour cent environ de l'énergie consommée dans le monde et il est particulièrement difficile de faire des prévisions à leur sujet; le revenu et la consommation d'énergie par habitant ont été faibles dans toutes ces parties du monde et n'ont que fort peu varié au cours de nombreuses années. Mais dans presque tous ces pays, des forces considérables semblent agir en faveur du développement économique et, dans plusieurs d'entre eux, les conditions nécessaires semblent réunies pour permettre une expansion assez rapide du revenu national. L'accroissement de la consommation d'énergie pourrait donc être considérable dans lesdits pays. Dans d'autres, il est possible que le revenu et la consommation d'énergie par habitant restent faibles. Pour prévoir le taux d'accroissement des besoins en énergie dans ces régions, on en est réduit à de simples hypothèses, mais on peut admettre, sans trop d'audace, un taux de 4 pour cent.

Les taux d'accroissement prévus pour les diverses régions donnent un taux d'accroissement global de 3 pour cent par an pour l'ensemble du monde, ce qui aurait pour effet de doubler, d'ici 1975, les besoins en matériaux énergétiques et de quadrupler, voire même de quintupler, ceux-ci vers l'an 2000. Ce chiffre reste un peu au-dessous du taux d'accroissement des besoins en énergie bruts prévus par l'auteur de l'étude des Nations Unies*, qui est de 3 $^1/_2$ pour cent. Mais des divergences entre ces évaluations sont bien moins importantes que le fait incontestable qui ressort des renseignements disponibles pour tout observateur compétent, à savoir que le taux d'accroissement des besoins mondiaux en énergie sera sans doute élevé et pourra même être très élevé (voir la figure 1).

NOTE SUR LA MANIÈRE DONT SE MESURE L'ÉNERGIE

En analysant ici les besoins en énergie, on a suivi la méthode adoptée dans le document de l'ONU et évalué l'énergie en termes d'unités homogènes (mégawattheure, Btu **, équivalent de houille grasse) produites et consommées dans l'économie mondiale. Cette méthode est parfaitement justifiée pour les besoins de cette Conférence; d'autre part, il y a tout lieu de considérer le problème de l'énergie comme un tout, puisqu'il y a possibilité de substituer les uns aux autres les combustibles minéraux, y compris les combustibles nucléaires, et qu'on peut également remplacer l'une par l'autre la chaleur et l'énergie, ou les diverses formes d'énergie.

Cependant, ainsi que le constate le rapport de l'ONU, si l'on s'appuie pour cette analyse sur des unités d'énergie interchangeables, on néglige certains aspects essentiels du problème de l'énergie elle-même. C'est ainsi qu'aucun produit ne peut remplacer le charbon pour fabriquer le coke métallurgique, ni le coke pour affiner le minerai de fer. Dans certaines régions, les produits pétroliers noirs seront indispensables au cours des prochaines années; or, une étude générale sur les besoins et les disponibilités en énergie ne fournira pas de renseignements utiles sur les conditions dans lesquelles les produits pétroliers noirs se trouveront disponibles. On peut dire, en outre, que l'énergie électrique ne peut pas se substituer à toutes les formes d'énergie mécanique et que, si la chaleur peut toujours être transformée en énergie et vice-versa, il n'en est pas moins important de savoir si cette conversion est pratiquement possible du point de vue économique. Au demeurant, si nous admettons l'existence de ces problèmes, nous en ferons néanmoins abstraction et nous appliquerons ici, aux différentes formes d'énergie, une unité de mesure commune, tout en soulignant que cette manière de faire laisse systématiquement de côté certains problèmes très importants.

Une autre difficulté se présente : l'on peut évaluer les besoins en énergie en mégawattheures produits ou en mégawattheures consommés; or, il n'existe pas de rapport stable ou prévisible entre ces quantités. Pour pallier cet inconvénient, on calculera donc les besoins en termes de charbon ou de pétrole, en mètres cubes de gaz ou en utilisant les autres unités de mesures qui s'appliquent en général à la production des matériaux énergétiques. Ces unités peuvent ensuite être converties en Btu ou en mégawattheures et les résultats ainsi obtenus indiqueront

* Il n'existe aucune autre étude qui donne des prévisions comparables à celles de l'ONU pour les régions et les périodes envisagées. Les calculs faits par Putnam (Palmer C. Putnam, *Energy in the Future*, D. Van Nostrand Co., N. Y., 1953) et par McCabe (Louis C. McCabe, *Energy in the Service of Man*, UNESCO/N. S./75, 11 juin 1951) s'appuient sur diverses évaluations relatives au taux d'accroissement de la population et au revenu par habitant; ces calculs ont l'avantage de montrer quel ordre de grandeur un taux d'accroissement continu, se poursuivant sur de nombreuses années, permettrait d'atteindre, mais ils ne constituent nullement des prévisions des besoins en énergie du monde.

** British Thermal Units; un Btu équivaut approximativement à 252 calories.

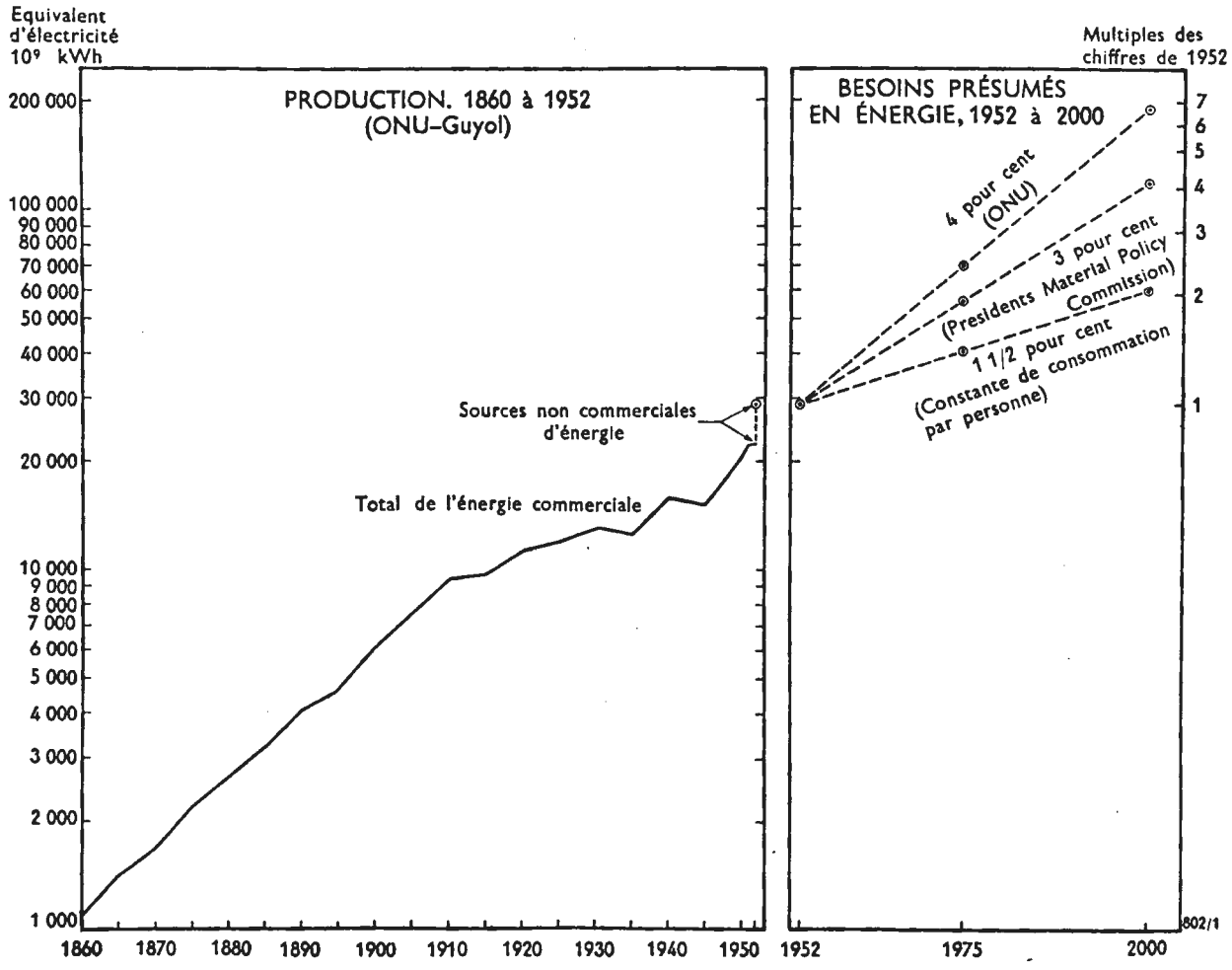


Figure 1. — Production mondiale d'énergie et besoins en énergie.

Source : Bureau de statistique des Nations Unies.

la quantité d'énergie qu'il faudra produire pour satisfaire la demande.

Les besoins peuvent aussi être exprimés d'après les quantités d'énergie livrées sur le lieu de consommation et utilisées pour le travail; c'est ce que le rapport de l'ONU appelle l'énergie utile, et cette énergie diffère des quantités produites évaluées en mégawattheures, par suite des pertes qui ont lieu lors de la production et du transport des matériaux énergétiques et de leur utilisation pour le travail. Ces pertes, évaluées en pourcentage de l'énergie produite ou consommée, sont dues à des causes nombreuses, en particulier à la nature des matériaux énergétiques employés et à leur mélange, à l'ampleur du processus de transformation lui-même, à l'accroissement du rendement, aux difficultés nouvelles auxquelles se heurtent l'extraction des matériaux énergétiques, aux distances moyennes de transport des matériaux énergétiques ou de l'énergie elle-même, etc. Dans les pays où les méthodes techniques sont très avancées, on constate que la consommation d'énergie n'augmente pas proportionnellement à la production. Cette tendance provient pour une bonne part de toutes les améliorations apportées à l'utilisation de l'énergie, dans l'industrie et ailleurs; ils n'existe donc aucun lien nécessaire entre les mégawattheures produits et consommés d'une part, et « l'énergie utile » d'autre part. Soulignons donc bien que; dans cette étude, les besoins sont exprimés en quantités de combustible produites et consommées et non pas en « énergie utile ».

DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUE ET CONSOMMATION D'ÉNERGIE

Nous avons souligné qu'à un taux de production élevé par habitant correspond en général un taux élevé de consommation d'énergie et que, pour évaluer les besoins futurs en énergie, il faut tenir compte de la cadence probable du développement économique. Nous nous proposons donc dans cette deuxième partie un double objectif : examiner les informations dont on dispose sur la corrélation existant entre le revenu réel et la consommation d'énergie par habitant dans divers pays; et examiner les divers rapports qui peuvent exister entre le rythme du développement économique et le taux d'accroissement de la consommation d'énergie.

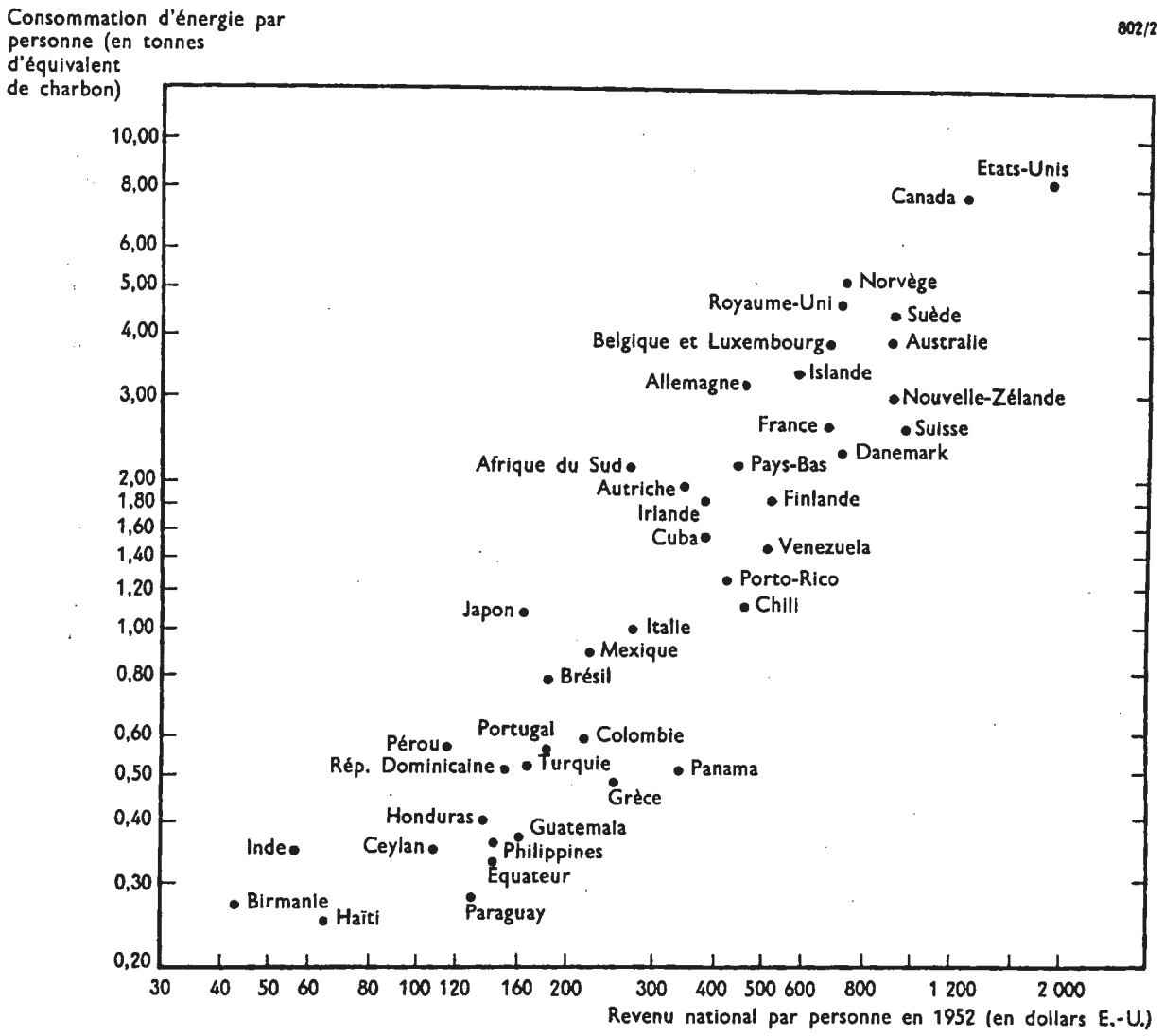


Figure 2. — Consommation d'énergie par rapport au revenu national, 1952.

Source : Bureau de statistique des Nations Unies.

CONSOMMATION D'ÉNERGIE ET REVENU NATIONAL

La figure 2 montre la corrélation qui existe entre le revenu national et la consommation d'énergie par personne dans quarante-deux pays, au cours de l'année 1952. Malgré l'insuffisance incontestable des données qui ont trait soit au revenu national, soit à la consommation d'énergie, il ressort clairement de ce graphique qu'il y a, en gros, une corrélation réelle entre le revenu national et la consommation d'énergie par personne*. De fortes différences

* Les éléments d'information sur lesquels s'appuient la plupart des estimations relatives à la consommation d'énergie non commerciale sont fragmentaires. Et pourtant la consommation d'énergie non commerciale constitue une partie importante et parfois capitale du total de la consommation dans bien des pays du monde. En l'absence de données suffisantes, on a procédé dans la plupart des cas à des évaluations *minima* des besoins d'énergie non commerciale pour la cuisine seulement (sans tenir compte du chauffage). Il en résulte que les évaluations de la consommation d'énergie peuvent être, dans bien des cas, très au-dessous de la réalité, et ceci, notamment, dans les pays insuffisamment développés où la consommation totale est faible. (On trouve aux pages 99 à 102 des *Études statistiques J-1* publiées par l'Organisation des Nations Unies, à New York, en septembre 1952, sous le titre *Ressources mondiales en énergie au cours de certaines années de la période de 1929 à 1950*, comment a été évaluée la consommation d'énergie non commerciale).

Dans la plupart des pays où le revenu national par habitant est faible, l'évaluation de celui-ci s'appuie aussi sur des données fragmentaires et il est permis de supposer, d'une manière générale, que dans les pays insuffisamment développés, l'évaluation du revenu national par personne reste au-dessous de la réalité. En conséquence, on peut admettre que la consommation d'énergie et le revenu par personne sont probablement un peu supérieur à ce qui est indiqué pour les pays qui figurent à gauche du graphique.

de revenu coïncident en effet avec de grosses différences dans la consommation d'énergie, et l'on peut admettre qu'à notre époque tout pays jouissant d'un revenu national élevé par habitant est appelé à consommer de plus en plus d'énergie.

Si cette corrélation n'est pas contestable, il n'en existe pas moins des différences notables entre les quantités d'énergie consommées par habitant dans chacun des pays qui disposent du même revenu annuel moyen. Dans les pays où ce revenu est inférieur à 200 dollars par personne, le rapport entre le revenu et la consommation d'énergie n'est pas particulièrement évident et il ne semble pas que ce manque apparent de corrélation soit dû à l'insuffisance des éléments d'information dont on dispose. Dans les pays où l'agriculture prédomine, le revenu moyen par personne peut varier de façon considérable, alors que la consommation d'énergie reste à peu près la même. Dans les pays économiquement développés, où les statistiques sont sans doute plus précises, un revenu donné par personne peut correspondre à des consommations d'énergie nettement différentes. C'est ainsi que le Danemark et la Norvège avaient, en 1952, à peu près le même revenu national par personne (725 et 714 dollars), alors que la consommation d'énergie par habitant était en Norvège le double de ce qu'elle était au Danemark (5,10 contre 2,77 tonnes métriques d'équivalent de charbon).

Certaines raisons permettent évidemment d'expliquer ces différences, par exemple le degré d'industrialisation d'un pays, la composition de la production industrielle, l'importance relative dans la structure industrielle des différents pays (certains procédés exigeant une forte consommation d'énergie), le climat, le rendement de l'énergie utilisée et les différences de prix de l'énergie. Dans le chapitre suivant du présent rapport, nous examinons les effets des différences de prix sur la consommation. Bien que les informations dont on dispose ne soient pas suffisantes pour permettre une analyse statistique détaillée de l'importance relative de ces facteurs variables, certaines observations s'imposent cependant.

Les transports, les industries extractives, la production d'énergie et certaines industries de transformation absorbent de grandes quantités d'énergie, à l'encontre de l'agriculture et des services, de sorte que la consommation d'énergie par habitant tendra à varier suivant l'importance relative de ces différentes branches d'activité dans l'économie d'un pays. Nous avons déjà signalé que l'industrie manufacturière et les transports absorbent 65 pour cent de l'énergie totale consommée dans le monde, bien qu'ils n'occupent qu'un cinquième environ du total des salariés. Il ressort de ce qui précède que la consommation d'énergie est fonction du degré d'industrialisation d'un pays et il n'est pas nécessaire d'ajouter qu'il existe une liaison étroite entre ce degré et le montant du revenu national.

A ce sujet, il est intéressant de constater que le pays qui fournit la plus forte proportion de produits domestiques d'origine agricole, de produits forestiers et de produits de la pêche (la Thaïlande, 57 pour cent en 1950), et où le pourcentage des personnes employées dans les secteurs en question est le plus élevé (88 pour cent en 1937), est en même temps l'un des plus faibles consommateurs d'énergie par habitant (0,29 tonne métrique en 1949). Il est intéressant de noter également que le Japon, qui dispose d'un revenu national relativement faible par personne (165 dollars en 1952), consomme cependant des quantités relativement fortes dénergie (1,07 tonne métrique en 1952). C'est que l'industrialisation, si elle va en général de pair avec un revenu élevé par habitant, a avant tout pour conséquence une forte consommation d'énergie. Mais il y a d'autre part certains pays, notamment l'Irlande et la Finlande, où la consommation d'énergie est forte bien que l'industrie n'y soit pas très développée*; il semble bien que ce phénomène soit dû au fait que ces pays ont un revenu relativement élevé par habitant; dans le cas de la Finlande, on peut aussi constater que la structure industrielle du pays a pour effet de multiplier les méthodes de travail utilisant de l'énergie.

Il est difficile d'exprimer quantitativement le rôle joué par l'industrialisation considérée comme facteur indépendant pour expliquer les différences de consommation d'énergie; cependant, la corrélation entre la consommation d'énergie et le degré d'industrialisation semble suffisamment évidente, dans les pays qui ont approximativement le même revenu par habitant, pour permettre de dire que ce facteur variable a une importance en soi.

La nature des industries qui existent dans un pays donné joue aussi un rôle considérable. La consommation d'énergie des industries de transformation par personne employée, par tonne de produit et par dollar de valeur ajoutée, varie notamment sur une large échelle. Le tableau 1, qui est emprunté au rapport de la President's Materials Policy Commission (vol. 3, p. 34), montre dans quelle mesure varient les quantités d'énergie consommées par les diverses industries utilisant des procédés électriques. Mais toutes ces industries absorbent de très grandes quantités d'énergie et s'il y a dans un pays une forte proportion d'industries de cette catégorie, celui-ci accusera nécessairement une forte consommation d'énergie par habitant.

Le Canada, par exemple, est moins fortement industrialisé que les États-Unis d'Amérique et le revenu national par personne y est nettement moins élevé. Cependant, le pourcentage de consommation d'énergie est presque aussi élevé au Canada

* En 1940, 57 pour cent des salariés travaillaient en Finlande dans les industries du secteur primaire; il y en avait 48 pour cent en Irlande. En 1952, le revenu national s'élevait en Finlande à 523 dollars par personne et en Irlande à 384.

Tableau 1

Énergie requise pour la fabrication par procédés électriques de certains produits

	kWh approximativement nécessaires pour une tonne de produit
Titane[a]	40 000
Aluminium	18 000
Silicium à 95 pour cent	17 500
Magnésium électrolytique	16 000
Peroxyde d'hydrogène à 35 pour cent (en partant d'une base à 100 pour cent)	16 000
Manganèse électrolytique	10 200
Carbure de silicium	8 600
Ferrotungstène à 70 pour cent	7 600
Chlorate de sodium	5 200
Rayonne	5 200
Acide phosphorique (au four électrique)	3 900
Zinc électrolytique	3 400
Chlore	3 000

[a] Sur la base de 20 kWh pour une livre de titane, d'après le rapport de la President's Materials Policy Commission sur le titane.

Source : Graphique relatif aux besoins en énergie pour la fabrication, *Chemical Engineering*, mars 1951, p. 115.

qu'aux États-Unis et sera peut-être plus élevé d'ici quelques années; ce qui est dû évidemment à l'existence, au Canada, d'une forte proportion d'industries utilisant des procédés électriques, et notamment de fabriques d'aluminium qui figurent parmi les industries qui consomment le plus d'énergie par tonne de produit. La Norvège fournit un autre exemple de ce genre, car sans être très fortement industrialisé, ce pays est un grand consommateur d'énergie par habitant, en raison de la nature même de ses industries. Les industries utilisant des procédés électriques figurent donc parmi les rares industries qui peuvent être attirées vers des régions où l'énergie est bon marché; et ceci nous oblige à remarquer que la présence simultanée de sources très importantes d'énergie potentielle bon marché et des matières premières utilisées par les industries en question, notamment en Afrique et en Amérique du Sud, pourrait promouvoir un accroissement très rapide des besoins en énergie dans ces régions.

Il est bien évident que le climat influe fortement sur les quantités d'énergie nécessaires pour chauffer (ou dans certains cas pour rafraîchir) les locaux. En outre, le chauffage absorbe un pourcentage étonnamment élevé de l'énergie totale consommée dans les pays froids. Si les statistiques dont on dispose ne permettent pas une évaluation précise elles permettent cependant de supposer que le chauffage (non compris celui des établissements industriels) absorbe au moins un cinquième de l'énergie totale consommée aux États-Unis. Ce chiffre est probablement plus élevé encore dans quelques autres pays. Les taux de consommation élevés du Danemark, du Canada, de la Finlande, de l'Islande, de la Norvège, de la Suède et de la Suisse sont dus, en partie certainement, à ce facteur. Quelles qu'en soient les raisons, il faut constater qu'une grande partie des pays économiquement sous-développés sont situés sous les tropiques. Dans ces conditions, on peut admettre que, dans ces parties du monde, le développement économique ne sera pas accompagné d'une consommation d'énergie aussi considérable que sous des climats plus froids.

On admettra enfin qu'il y a de nettes différences de rendement dans l'utilisation de l'énergie, d'un pays à l'autre. Il semble juste de supposer que le rendement de certains combustibles est meilleur dans les pays plus évolués que dans les autres. Ceci admis, il en résulte que ces derniers pays auront besoin de quantités d'énergie plus grandes, pour chaque unité de produit national, que s'ils disposaient des techniques des pays plus évolués.

L'examen de l'influence qu'exercent ces facteurs et d'autres encore sur la consommation d'énergie par personne vient à l'appui de nos conclusions : alors que dans un pays jouissant d'un climat donné, d'une structure économique relativement stable et capable d'obtenir de l'énergie un rendement normal, la corrélation entre le développement économique et les besoins en énergie peut être évaluée avec assez de précision, la question devient bien plus complexe si l'on cherche à évaluer cette même corrélation sur le plan mondial. Ceci dit, nous passons à un examen plus détaillé des rapports existant entre le développement économique et la consommation d'énergie.

Évolution de la consommation d'énergie et du revenu national

Dans la première partie de ce rapport, nous avons proposé de répartir les pays du monde en trois catégories pour établir une corrélation entre les besoins en énergie et le rythme probable du développement économique. Dans la première catégorie figurent les pays dont l'économie peut être qualifiée d'industriellement adulte, à savoir les États-Unis, la plupart des pays de l'Europe occidentale, et peut-être, quelques autres régions encore. Pour les besoins de notre étude, nous disons que ces pays offrent deux traits caractéristiques qui permettent d'apprécier le taux probable d'accroissement de leurs besoins en énergie. En premier lieu, ces pays ont fourni la preuve qu'ils sont capables d'un développement économique qui s'exprime à la fois par un accroissement du revenu national et par un accroissement du revenu par personne, et ils ont en outre créé des institutions et un mode de vie qui impliquent un développement économique continu. En second lieu, l'activité industrielle tend, dans ces pays, à une relative stabilité si on l'envisage sur une courte période, et à une évolution continue si

on l'envisage sur une longue durée. L'importance relative de la production agricole dans ces pays continuera probablement à décroître, mais à un rythme moindre toutefois que pendant la période d'industrialisation rapide. L'industrie de transformation continue à se développer lentement en liaison avec les autres secteurs, mais d'une manière cependant moins rapide que la distribution et les autres services qui constituent ce que l'on appelle communément le secteur tertiaire. Dans les pays de cette catégorie, les besoins en énergie tendent à s'accroître à peu près au même rythme que la production nationale brute ou même plus lentement.

Les tendances à long terme de l'évolution du revenu national, jointes à des institutions qui semblent garantir, en général, un taux relativement élevé de formation de capital, un afflux continu de procédés nouveaux permettant d'accroître le rendement, et la formation régulière de personnel administratif et technique qualifié pour diriger le processus de la production, tous ces éléments permettent de conclure que le développement économique est devenu presque automatique dans les pays en question. Toutefois, le rythme de ce développement varie suivant les cas, en raison des différences des taux d'accroissement de la population et de celles qui existent entre les taux d'accroissement de la productivité par habitant. Le taux moyen annuel d'accroissement de la production nationale brute a été, aux États-Unis, au cours des cinquante dernières années, de 3 pour cent environ, et celui du revenu national par habitant de 2 pour cent environ. Depuis quelques dizaines d'années, la Suède a accusé un taux d'accroissement de l'économie nationale un peu plus élevé encore, alors que ce taux est resté un peu plus faible dans la plupart des autres pays de cette catégorie.

La place occupée par l'industrie dans ces pays est relativement stable. Le pourcentage des employés salariés de l'industrie de transformation a augmenté régulièrement aux États-Unis jusqu'en 1920, pour baisser ensuite un peu entre 1920 et 1930. Ce pourcentage est légèrement plus élevé depuis la fin de la guerre, en raison peut-être de l'activité relativement grande qui s'est maintenue dans les industries de guerre. Le pourcentage des personnes employées dans les entreprises commerciales ou financières ainsi que dans les services administratifs officiels ou privés s'est accru rapidement [4]. Le pourcentage des personnes employées dans l'industrie est resté relativement stable dans le Royaume-Uni depuis plusieurs dizaines d'années, et la même constatation peut être faite dans la plupart des pays industriellement évolués. Le taux d'accroissement en valeur de production, calculé par ouvrier, tend encore à s'élever davantage dans l'industrie de transformation de ces pays que dans la plupart des autres secteurs de l'activité économique; mais, dans ce type d'industrie, le taux d'accroissement de la production semble, dans l'ensemble, rester très en dessous de ce qu'il était pendant la période d'industrialisation rapide.

Pour ces pays, que nous avons qualifiés d'industriellement évolués, le taux d'accroissement de la consommation d'énergie a été légèrement inférieur au taux d'accroissement du produit national brut. Aux États-Unis, le nombre de Btu consommés par dollar de produit national brut, calculé sur la base des prix de 1939, a diminué, passant de 300 000 en 1909 à 230 000 en 1952. Les chiffres donnés par Putnam accusent une diminution de 50 pour cent en 80 ans pour le Royaume-Uni et de 20 pour cent en 15 ans pour le Japon. Il est bien évident que si, à l'intérieur d'un secteur industriel relativement stable dans son ensemble, les entreprises qui sont de fortes consommatrices d'électricité se développent au détriment des autres ou inversement, les tendances constatées pourront se trouver complètement modifiées.

Les pays du second groupe se trouvent nettement entraînés dans un mouvement d'industrialisation rapide. Certains pays de l'Amérique latine rentrent dans cette catégorie, notamment le Mexique, la Colombie, le Brésil et le Venezuela, ainsi que l'U.R.S.S. et, peut-être, certains autres pays de l'Europe orientale. On peut dire que ces pays ont atteint, ou sont en voie d'atteindre, le stade où ils auront intégré le processus d'expansion économique. Ils ont en effet franchi le fossé qui sépare les régions sous-développées, à l'économie relativement stagnante, des régions où la technique est évoluée, qui sont de fortes consommatrices de capitaux et où l'accroissement du revenu national par habitant est devenu presque automatique. Elles se distinguent toutefois aussi des pays de la première catégorie car, dans ces derniers, le secteur industriel (industries de transformation, industries extractives et transports) absorbe un pourcentage toujours plus élevé (et qui parfois s'accroît très rapidement) du total de la main-d'œuvre, surtout aux dépens de l'agriculture.

Le revenu national augmente rapidement dans ces pays, en raison à la fois d'un accroissement rapide de la population et d'une augmentation rapide du pourcentage des employés salariés. Mais il est possible que la consommation d'énergie augmente plus rapidement que le produit national brut en raison surtout de l'importance croissante accordée aux transports et au secteur industriel dans ces économies. Les chiffres relatifs au taux d'accroissement de la consommation d'énergie commerciale donnent sans doute une idée excessive du taux d'accroissement de la consommation totale d'énergie, car il y a eu et il y a encore, dans bon nombre de ces pays, des changements notables dans les sources d'énergie utilisées, l'énergie commerciale se substituant souvent à l'énergie non commerciale (c'est ainsi que de 1925 à 1951 l'utilisation en Argentine des feux de bois et d'autres sources non commerciales d'énergie a diminué, passant de 43 à 26 pour cent du total de la consommation énergétique, alors que la consommation par habitant a augmenté de 35 pour cent). Il est juste de dire également qu'un meilleur rendement de l'énergie utilisée a pour effet

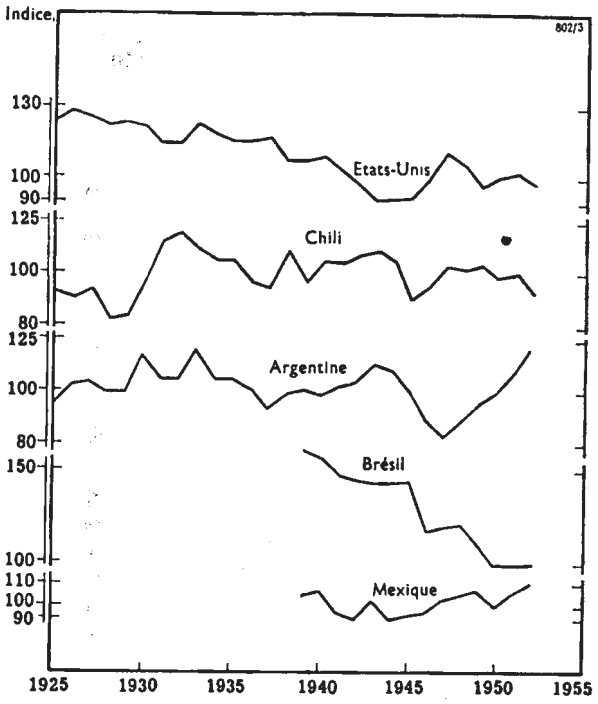


Figure 3. — Évolution de la consommation d'énergie par unité de produit national (1950 = 100).

Sources : États Unis : Bureau of Mines (énergie commerciale seulement); autres pays : A. Dorfman (consommation totale d'énergie).

de ralentir nettement le rythme d'accroissement des besoins en énergie (voir la figure 3).

Le troisième groupe de pays comprend la plupart des régions sous-développées du monde où le revenu par habitant est faible et n'a pas augmenté de manière appréciable au cours des dernières dizaines d'années. Il serait faux toutefois de considérer ces régions comme totalement stagnantes au point de vue économique, car on y trouve parfois certaines formes d'activité économique utilisant des techniques avancées. Cependant, dans la plupart de ces pays, ces formes d'activité ne sont que de simples enclaves sans lien organique avec un processus de croissance qui entraînerait normalement avec lui, pour l'ensemble de l'économie, un accroissement continu du revenu individuel. Toutes ces régions ne consomment qu'un faible pourcentage de l'énergie utilisée dans le monde et les accroissements de la consommation d'énergie constatée récemment dans ces pays n'ont pas été très élevés.

Il existe toutefois, en même temps, dans la plupart des gouvernements des pays en question, une volonté bien arrêtée d'assurer le développement économique de leur pays, volonté qui coïncide avec le désir (qui n'a guère de précédent dans l'histoire) des pays économiquement avancés d'aider les pays sous-développés dans leur évolution. Dans ces conditions, ce serait une erreur d'essayer d'évaluer les besoins probables d'énergie de ces pays en s'inspirant des tendances de leur consommation d'énergie dans le passé. Par contre, il serait sans doute également faux de supposer que ces pays, surtout lorsqu'ils ont une forte densité de population, pourront faire leur, du jour au lendemain, un processus de croissance que les nations économiquement plus avancées ont mis des dizaines d'années à intégrer. Dans certaines des régions actuellement sous-développées, le rythme du développement économique peut être très rapide au cours de la période envisagée tandis qu'il ne le sera pas dans d'autres. La seule chose qu'on puisse escompter d'une manière à peu près certaine, c'est que dans les pays actuellement sous-développés où un progrès économique devient possible, l'industrialisation aura pour corollaire un accroissement des besoins en énergie nettement plus rapide que l'augmentation du produit national brut.

En examinant quels pourront être les besoins en énergie de pays dont le développement économique se trouve plus ou moins évolué, nous avons attiré l'attention sur deux facteurs qui ont, à notre avis, une importance capitale : d'une part, l'économie du pays est-elle organisée de façon à garantir que la formation du capital, les progrès techniques et l'augmentation du personnel administratif et technique qualifié se feront à un rythme suffisant pour justifier l'espoir d'un développement économique continu? Et, d'autre part, quelle sera l'importance relative, dans cette économie en plein essor, des entreprises qui sont de grosses consommatrices d'énergie? Dans le tableau 2, nous avons cherché à réunir certaines données relatives à la consommation d'énergie par dollar de revenu national produit dans les divers secteurs de l'économie aux États-Unis.

CONDITIONS NÉCESSAIRES A L'UTILISATION DE L'ÉNERGIE

L'étude qui précède a porté sur un certain nombre de facteurs qui influent directement sur la consommation d'énergie. Nous examinerons maintenant l'importance qu'il faut attribuer aux quantités et aux prix de l'énergie disponible pour expliquer l'accroissement du revenu national global et individuel, ainsi que le taux d'accroissement de la consommation d'énergie dans les régions en voie de développement. Dans quelle mesure l'offre de grandes quantités d'énergie à un prix peu élevé a-t-elle contribué au développement économique de certaines régions et dans quelle mesure, au contraire, le coût élevé de l'énergie a-t-il eu pour effet, dans d'autres régions, de freiner cette évolution ?

D'après les exemples dont on dispose, il semble possible de conclure que le coût de l'énergie a sans doute un rôle important, mais ne constitue pas un facteur déterminant du développement économique. D'une manière générale, ce développement, ainsi que la production et l'utilisation d'énergie, exigent de gros investissements de capitaux; en outre, si un pays ne dispose pas d'une

Tableau 2

Consommation d'énergie et revenu produit dans les divers secteurs de l'industrie aux États-Unis en 1947

Secteur	Consommation d'énergie (10^{12} Btu)	Revenu produit (en millions de dollars)	Coefficient de consommation d'énergie; 10^3 Btu pour 1 dollar de revenu national
Agriculture, sylviculture et pêcheries	887	18 244	49
Industries extractives (y compris l'extraction du pétrole brut et du gaz naturel)	1 114	4 776[c]	233
Transports	*8 640*[a]	*11 498*	*751*
Chemins de fer	3 782	6 294	601
Divers (y compris les pipe-lines)	4 812	5 204	925
Industries de transformation	*9 611*[b]	*58 132*[c]	*165*
Production d'énergie	1 092	1 705[c]	640
Métaux et dérivés	3 515	11 050[c]	318
Produits chimiques et similaires	1 023	3 963	258
Articles en pierre, en céramique et en verre	890	1 815[c]	490
Articles textiles	386	4 657	83
Papier et produits similaires	633	2 207	287
Divers	1 997	32 935	61
Secteur privé et secteur commercial	9 504	(104 518)	(91)
Armée	269	—	—
Énergie utilisée autrement que comme combustible	1345	—	—
Divers, pertes et omissions	2 146	—	—
Consommation nationale globale	*33 516*	*197 168*	*170*
Exportations	3 007	—	—
Total des disponibilités	*36 523*	—	—

[a] Y compris 46×10^{12} Btu non attribués aux secteurs en question.

[b] Y compris 75×10^{12} Btu non attribués aux secteurs en question.

[c] Nous avons réajusté le revenu des industries extractives; en effet, il avait été sous-évalué dans les statistiques officielles (estimation établie à 585 millions de dollars) par suite d'une intégration verticale des industries extractives et de transformation des produits miniers, de l'inscription de leur revenu global à l'actif des industries de transformation, et pour d'autres raisons encore. On trouvera aux pages 8 et 9 du *Minerals Yearbook* de 1951 la manière dont cet ajustement a été fait. Les chiffres relatifs aux industries de transformation ont été diminués en conséquence.

Sources : Les chiffres relatifs à la consommation d'énergie ont été empruntés au tableau 4 de « Production, Consumption and Uses of Fuels and Electric Energy in the United States in 1929, 1939 and 1947 » par W. H. Lyon and D. S. Colby, Bureau of Mines, *Report of Investigations 4805*, États-Unis, Département de l'intérieur, octobre 1951. Les chiffres relatifs au revenu national, modifiés conformément à ce qui a été dit à la note *c*), ont été empruntés au tableau 13 qui figure aux pages 176 et 177 du *National Income Supplement to the Survey of Current Business*, édition 1954, États-Unis, Département du commerce, Office of Business Economics, Washington, 1954.

industrie métallurgique et mécanique importante, il aura besoin d'un montant très élevé de devises étrangères pour créer des industries productrices et consommatrices d'énergie. Il est bien évident qu'une baisse du coût de l'énergie n'aura d'effet prononcé sur le développement économique d'un pays que si celui-ci peut, en même temps, disposer des capitaux et des devises nécessaires.

Les constatations historiques récentes donnent une idée du rôle que pourra jouer l'énergie nucléaire, à condition de ne pas perdre de vue certaines limitations. Les constatations faites dans le passé ont porté sur les écarts constatés entre le prix de l'énergie dans différents centres utilisant des combustibles classiques. Si le prix de l'énergie nucléaire reste dans les limites en question et si l'utilisation de cette nouvelle source a simplement pour effet de réduire de manière appréciable le prix de l'énergie dans les régions où celui-ci est élevé et de freiner la tendance à la hausse dans les régions où ce prix est bas, les constatations faites dans le passé permettront de se faire une idée des conséquences probables de l'utilisation de l'énergie atomique. Si, au contraire, l'énergie nucléaire devient disponible en quantités considérables et à très bas prix, il deviendra possible, à un moment donné, de l'utiliser à des fins inconnues jusqu'ici (par exemple pour dessaler l'eau de mer en vue de l'irrigation), et le point de vue exprimé ici devra sans doute être revisé. Les expériences passées peuvent, sans aucun doute, permettre d'estimer dans quelle mesure les installations atomiques provoqueront à une réduction du prix de

l'énergie des centrales modernes, mais non de formuler des hypothèses quant aux utilisations nouvelles qui pourront devenir possibles grâce à l'énergie nucléaire.

Le transport de l'énergie et son prix dans les divers pays

Ce n'est pas pour des raisons accidentelles que l'industrie s'est tout d'abord développée au voisinage des sources d'énergie. Mais, avec les progrès de la révolution industrielle, un certain nombre d'influences sont venues minimiser le rôle joué par le bois, par le charbon et par l'énergie hydraulique, lors de la création des centres industriels de développement économique. Les transports sont, en effet, devenus plus sûrs, plus rapides et des quantités beaucoup plus considérables de matériaux ont pu être transportées. Des marchés se sont ouverts en d'autres endroits, les communications sont devenues plus rapides, on a découvert des énergies concurrentes ou de nouvelles sources d'énergie. La présence de combustibles ou d'énergie, tout en gardant une importance, a cessé de jouer un rôle de tout premier plan pour le développement industriel. Et dès lors que le volume de l'énergie disponible pour les régions déficitaires n'est plus limité par des problèmes matériels ou administratifs, on peut poser la question du prix de l'énergie sur le plan de la concurrence. De ce point de vue, il faut alors constater que les variations du prix de l'énergie entre les divers pays proviennent de l'éloignement des sources d'énergie, des diverses méthodes de transport et des tarifs appliqués, ainsi que de la nature variable de l'énergie disponible sur le marché international.

Au cours du siècle dernier, la question du transport de l'énergie a évolué d'une façon très complexe, mais dans le sens d'une réduction très nette des différences de tarifs. Il ressort en effet, du tableau D de l'annexe, qu'en 1871 le prix payé pour le transport de charbon pouvait atteindre, suivant la destination, entre une et quatre fois le prix du charbon lui-même au lieu d'exportation (Cardiff). Les frais de transport ont diminué nettement au cours des 30 années qui ont suivi et, en 1902, ils étaient inférieurs au prix du charbon, au lieu d'origine, sauf dans le cas de transports vers un petit nombre de régions très éloignées. Ainsi donc, le rapport entre le prix du transport du charbon et le prix du charbon lui-même, à Cardiff, a baissé dans une proportion variant entre la moitié et les trois quarts. Cette baisse a été due surtout à l'abandon de la navigation à voile et à l'utilisation de bateaux à vapeur plus grands et plus rapides, ainsi qu'à une augmentation du prix du charbon à la mine. Au cours des vingt années suivantes, les prix de transport du charbon ont baissé encore par rapport aux prix du charbon au lieu d'origine.

Pendant la première moitié du xx^{e} siècle, l'emploi toujours plus répandu du pétrole — dont le pouvoir calorifique est très élevé, alors que son transport par bateaux-citernes, compté en tonnes par mille, est bien moins coûteux — a eu pour effet de réduire encore les différences du prix de l'énergie suivant les régions. Il ressort des chiffres dont on dispose pour 1951 que, pour transporter le charbon par mer, il fallait payer le double ou même trois fois plus par unité thermique que pour transporter le pétrole [5] :

	En dollars, par million de kWh, par mille	*En millièmes de dollars, par million de Btu, par mille*
Navires charbonniers .	0,27 à 0,45	0,08 à 0,13
Cargos pétroliers . . .	0,15	0,043

Le transport du pétrole et du gaz par pipe-line a aussi permis de réduire les différences de prix géographiques. Ces différences entre le prix de l'énergie, suivant les régions, ont encore été réduites par suite de la découverte et de l'exploitation, dans de nouvelles régions, de matériaux énergétiques, au premier plan desquels figure le pétrole découvert dans le Moyen-Orient et en Amérique du Sud. Enfin, la tendance à une égalisation des prix de l'énergie dans les différentes régions a été accentuée par la hausse du prix de l'énergie dans certains pays où celle-ci était traditionnellement bon marché. En Europe occidentale notamment, la consommation de charbon a fortement activé la production et il commence à en être de même pour le pétrole aux États-Unis; il a donc fallu creuser des puits plus profonds et le forage est devenu plus onéreux.

L'apparition du combustible nucléaire, dont le poids est négligeable, aura certainement pour effet de réduire les différences géographiques de prix d'une façon plus radicale encore, et de renforcer une tendance qui s'est manifestée nettement depuis un siècle. Le lien qui rattache l'industrie aux régions productrices de matériaux énergétiques deviendra sans aucun doute de plus en plus faible.

Les différences de prix du combustible constatées actuellement sur le marché international ne sont toutefois pas négligeables. Ces prix varient entre 0,10 dollar et plus de un dollar pour un million de Btu. Si nous classons les pays d'après le prix du combustible, nous trouvons en tête de la liste, avec le prix le plus faible, des pays comme l'Union Sud-Africaine et certaines parties des États-Unis, tandis que le Japon et le Brésil se classent parmi les pays où le combustible est le plus cher. La plupart des pays d'Europe figurent à peu près au milieu de la liste.* [6]

Portée de ces différences de prix

Quelle est l'importance, pour le développement économique, des différences de prix des matériaux énergétiques constatées entre les divers pays ? Disons tout d'abord que le prix de l'énergie ne

* L'étude de Schurr et Marschak contient une carte détaillée indiquant les prix de l'énergie dans le monde en 1937.

permet pas toujours de savoir avec exactitude à quelles conditions l'énergie est disponible, de même que les données relatives au prix et au taux de consommation de l'énergie n'indiquent pas clairement si une augmentation des quantités disponibles (augmentation qui ne serait pas accompagnée d'une modification de prix) aurait une influence sur le développement économique. Le prix de l'énergie dans une région donnée indique à quelles conditions on peut obtenir de l'énergie au meilleur des cas, bon an mal an. A certains moments, en effet, la demande peut être deux fois plus forte que les quantités d'énergie effectivement disponibles au prix indiqué. Cela arrive souvent dans les pays en plein essor, où les à-coups du développement économique peuvent être tels qu'une augmentation des quantités d'énergie disponible pourrait accroître la production nationale dans une proportion plusieurs fois supérieure au prix payé pour augmenter la fourniture d'énergie *.

De plus, s'il est possible de satisfaire intégralement la demande au prix fixé, il peut arriver qu'une offre plus forte d'énergie provoque l'essor du développement économique, même si le prix de l'énergie n'a pas baissé. Enfin, les données dont on dispose ne tiennent pas compte des cas où le combustible commercial reste absolument inemployé en raison du prix élevé des transports. Dans certaines régions, en effet, il est probable que le prix actuel de l'énergie abaisse ou retarde tout développement économique qui serait autrement possible; et, dans ces régions-là, le développement économique pourrait évidemment être stimulé par la possibilité de disposer d'une nouvelle source d'énergie qui ne serait pas grevée de lourds frais de transport : ce sont là des possibilités qu'il ne faut pas ignorer.

Compte tenu de ce qui précède, il n'en reste pas moins vrai que, dans la plupart des régions, on peut disposer d'énergie à un prix donné. En outre, pour une période déterminée, ce prix fournit sans doute une indication assez juste des conditions auxquelles on peut se procurer l'énergie. Si l'énergie à bas prix était absolument indispensable au développement économique, il en résulterait une certaine corrélation entre le prix de l'énergie et le degré de ce développement; or, de même qu'un rapprochement entre la courbe des variations du revenu national par habitant et celle des variations du prix de l'énergie ne permet de constater aucune corrélation précise, nous ne devons pas non plus espérer trouver dans les différences de prix de l'énergie une explication valable des différences constatées dans le développement économique. Si l'on veut apprécier l'effet d'une hausse du prix du combustible et de l'énergie sur la production d'une livre de métal, on constate qu'une augmentation de 2 millièmes de dollar par kilowattheure des frais de transport du combustible entraînerait peut-être un accroissement de 10 pour cent du prix du lingot d'aluminium ou de magnésium, un accroissement moindre du prix du lingot d'un autre métal, et une augmentation encore plus faible du prix de produits métalliques manufacturés. Et les variations du prix de l'énergie ont sur les prix des métaux une influence bien plus considérable que sur les prix de la plupart des autres produits.

Les différences de prix constatées actuellement pour le combustible ne peuvent donc expliquer, à elles seules, les différences dans le développement économique des diverses régions. Ainsi qu'il a été dit, il y a des pays sous-développés où le combustible coûte cher et d'autres où il est bon marché. Il y a également des pays très industrialisés où le combustible est bon marché et d'autres où il est cher. Il arrive parfois que, dans un même pays, le prix du combustible et celui de l'énergie varient d'une région à l'autre dans des proportions aussi considérables qu'entre deux pays différents. Aux États-Unis, par exemple, le prix des combustibles est dix fois plus élevé dans certaines régions que dans celles où ils sont le moins cher. Au Canada, les différences sont encore plus accusées.

L'utilisation de la même quantité d'énergie peut aussi produire un rendement bien plus avantageux selon les techniques employées; et c'est encore là un facteur qui permet de mieux comprendre le rôle que le prix de l'énergie peut jouer dans le développement économique. Les variations des quantités de matériaux énergétiques disponibles et l'amélioration des transports en général n'avaient pour effet de réduire le prix de l'énergie que dans les régions déficitaires; mais les progrès techniques réalisés dans l'utilisation de l'énergie ont réduit son prix dans tous les pays. Dans certaines industries, l'augmentation du rendement a été tout à fait remarquable. En produisant de l'électricité à partir du charbon, par exemple, les États-Unis ont réussi à faire passer leur consommation de 7 livres environ par kWh il y a un demi-siècle à moins d'une livre actuellement. Dans les chemins de fer, la baisse a été également importante : l'utilisation des moteurs diesel a suffi, à elle seule, à réduire les Btu nécessaires par tonne-kilomètre à 20 pour cent seulement de la quantité utilisée antérieurement par les locomotives à vapeur (et la baisse de consommation est peut-être encore plus considérable). Un meilleur rendement du combustible utilisé (c'est-à-dire l'utilisation par l'industrie

---

* Pour les expériences faites en Amérique latine, voir Adolpho Dorfman, *Development of Electricity Production and Consumption as Related to the Process of Industrialization in the Latin American Countries*, Conférence mondiale de l'énergie, Rio de Janeiro, juillet 1954 :

« On peut citer bien des cas où, par suite du manque d'électricité, il n'a pas été possible de monter de nouvelles usines et où les projets d'expansion des usines déjà établies ont dû être limités ou ajournés indéfiniment. Un rationnement sévère a dû parfois être imposé dans bien des villes, tant aux industries qu'aux particuliers, ce qui a compromis l'activité des industries de base; parfois, enfin, une demande excessive d'électricité a eu pour effet de surcharger le réseau et de nuire au bon fonctionnement des services en entraînant des voltages trop faibles, des pannes fréquentes, etc. »

d'une plus faible quantité de combustible par unité de produit) peut être constaté également dans la fabrication de l'acier, la production de ciment, les industries chimiques, le chauffage des locaux et dans la plupart des cas où l'on utilise de l'énergie, bien que l'amélioration ne soit pas, en général, aussi frappante que lorsqu'il s'agit de transformer le combustible en énergie électrique ou de remplacer les locomotives à vapeur par des diesels. Barnett a constaté que la consommation d'énergie commerciale avait baissé aux États-Unis, par unité de produit national, dans la proportion de 1 pour cent environ par an entre la première guerre mondiale et 1947 (voir la figure 3) et il suppose que cette baisse se poursuivra pendant quelques années encore [7]. Selon la Commission économique pour l'Europe, le rendement de l'énergie utile s'est accru dans le Royaume-Uni à peu près au même rythme entre 1913 et 1947 [8]. Cette amélioration du rendement équivaut à une réduction du prix de l'énergie dans les régions qui disposent des techniques nécessaires. Si cette dernière condition est réalisée, la réduction de prix due à un meilleur rendement peut produire le même effet sur la consommation d'énergie et sur le développement économique que la découverte de nouvelles sources de matériaux énergétiques ou des améliorations apportées à la production de l'énergie ou à son transport.

Besoins en capitaux et en devises

Les prix des matériaux énergétiques ont eu tendance à baisser depuis plus d'un siècle partout où ils étaient rares et onéreux, et le coût de l'énergie utile a baissé dans tous les pays. En bien des régions du monde, cependant, cette baisse de prix n'a pas donné lieu à un accroissement rapide des quantités d'énergie consommées. Pour expliquer ce phénomène, il faudrait procéder à un examen bien plus approfondi des conditions du développement économique que nous n'en avons l'intention ici. La réponse devrait toutefois tenir compte d'un ensemble de faits incontestables : une forte consommation d'énergie, correspondant à un revenu national élevé par habitant et à un rythme rapide de développement économique, exige des investissements de capitaux et des disponibilités en devises, ce qui constitue un obstacle pour bien des pays. Avec les techniques modernes, la production d'énergie implique nécessairement une grande consommation de capitaux, et c'est une des raisons pour lesquelles un accroissement de la production d'énergie dans un pays qui manque de capitaux ne s'accompagnera pas nécessairement du développement d'industries fortes consommatrices d'énergie.

Une étude récente de la Commission économique pour l'Europe [9] indique quels investissements sont nécessaires pour fournir un kWh d'énergie supplémentaire dans certains pays d'Europe. Le chiffre de 0,10 dollar pour un kWh semble être assez exact. Imaginons alors ce que coûterait une augmentation de la consommation portant sur 250 millions de kWh par an, ce qui représente, en gros, la production d'une usine d'une puissance de 70 000 kW pour un coefficient d'utilisation de 40 pour cent. Les investissements nécessaires pour produire l'énergie électrique, la transporter et la distribuer seraient de l'ordre de 25 millions de dollars. Si l'on peut se procurer du combustible dans la région, il faudrait encore prévoir plusieurs millions de dollars d'investissements pour la production et le transport de celui-ci. De plus, il faut tabler avec d'autres investissements encore dans les industries de consommation elles-mêmes. Il ressort, en effet, du tableau 3, qui s'appuie sur les expériences faites aux États-Unis, que ces investissements varient suivant les industries consommatrices d'énergie, mais qu'ils peuvent être plusieurs fois supérieurs aux investissements faits dans les industries productrices de combustible et d'énergie elles-mêmes.

Tableau 3

Investissements nécessaires pour aménager et équiper, dans certains secteurs, des usines consommant environ 250 millions de kWh

Industries (avec leur n° de recensement)	Millions de dollars 1947
21. Manufactures de tabac	310
22. Filatures	90
23. Confection et articles similaires. . .	370
24. Industries du bois et produits similaires (à l'exception du mobilier) . .	300
25. Fabriques de meubles et accessoires mobiliers	290
29. Pétrole et produits du charbon . .	270
32. Industrie de la pierre, céramique, verrerie	110
33. Métallurgie	110
34. Industries de transformation des métaux	350

Source : Annexe au tableau E (*in fine*).

Une centrale fournissant 70 000 kW représente un supplément insignifiant d'énergie pour les pays très industrialisés, puisque la puissance installée aux États-Unis dépasse largement à l'heure actuelle 100 millions de kW. Or, pour porter la consommation d'énergie de l'un quelconque des pays de l'Asie du Sud à un quart par exemple de la consommation d'énergie électrique par personne des États-Unis, il faudrait investir des capitaux dont le chiffre atteindrait deux ou trois fois le revenu national de ces pays. Ces chiffres montrent à quel point les possibilités d'utiliser des quantités d'énergie supplémentaire dépendent d'un accroissement simultané du taux des investissements.

Mais la pénurie de capitaux n'est pas le seul facteur qui limite le développement de la production

et de la consommation d'énergie dans un pays. En effet, les pays qui ne disposent pas d'une industrie sidérurgique et mécanique assez importante ont besoin, pour la plupart de leurs installations, d'un chiffre énorme de devises étrangères. Il ressort du tableau 4 que pour réaliser six plans d'usines électriques en Amérique latine, il faudra couvrir en devises étrangères, suivant le cas, un tiers et parfois même les deux tiers des investissements nécessaires.

Tableau 4

Dépenses afférentes à certains plans d'usines électriques financées par des prêts de la Banque internationale pour la reconstruction et le développement [a]

Pays et projet	Dépenses totales (en milliers de dollars des États-Unis)	Pourcentage de devises étrangères nécessaires
Brésil (Paulo Alfonso) . . .	38 448	41
Colombie (Anchicaya Project)	13 296	36
Colombie (Lebrija Project)	6 898	41
Mexique (Programme de la Federal Power Commission)	49 068	60
Mexique (Mexican Light Power)	41 800	62
Uruguay (Programme de l'UTE)	36 567	72

Source : Contrats de la Banque internationale pour la reconstruction et le développement.

[a] Dorfman, Adolfo *The development of Electricity Production and Consumption as related to the Process of Industrialization in the Latin American Countries*, Conférence mondiale de l'énergie, Rio de Janeiro, juillet 1954, Sujet 1, première partie, p. 38, tableau 7.

De plus, si à une augmentation des investissements en vue de la production d'énergie électrique correspond un accroissement des importations de combustibles, les difficultés de change peuvent s'en trouver accrues. Dans les pays où les matériaux énergétiques font défaut, un pourcentage assez considérable des besoins en devises est dû aux importations de ces matériaux. D'après Dorfman, l'Argentine a dû importer, en 1952, 65 pour cent du total de l'énergie commerciale consommée dans le pays, tandis que le Chili et le Brésil en ont importé 30 pour cent. Les importations de charbon et de pétrole représentent plus de 10 pour cent de la valeur totale des importations de ces trois pays.

La fourniture d'énergie nucléaire à bas prix permettrait évidemment de réduire de façon appréciable la quantité de devises dont les pays qui doivent importer le combustible ont besoin chaque année. Cependant, les investissements de capitaux nécessaires à la production d'énergie nucléaire sont très élevés et les pays les moins développés auront sans doute besoin d'un fort pourcentage de devises étrangères pour établir les installations nécessaires.

Ce rapide examen des difficultés auxquelles se heurte une expansion de la production et de la consommation d'énergie permet de conclure qu'une réduction du prix de l'énergie, si importante soit-elle, ne permettra un fort accroissement de la consommation d'énergie que si certaines conditions favorables se trouvent réalisées. Il faut, en effet, des capitaux considérables pour produire de l'énergie et aussi pour en consommer sous certaines formes. Dans les pays où les capitaux ne s'accumulent qu'à un rythme très lent, il semble qu'une certaine accélération de ce rythme soit la condition nécessaire d'une augmentation notable de la consommation d'énergie. Comme le pourcentage de devises étrangères à investir dans la production d'énergie est très élevé dans la plupart des pays sous-développés, il serait très important de savoir à quelles conditions ces pays pourront obtenir des capitaux étrangers avant de dire dans quelle mesure leur consommation d'énergie pourra s'accroître.

L'énergie dans l'économie des États-Unis de 1900 à 1950

Si l'on examine les différences de prix de l'énergie dans les divers pays et l'influence des progrès techniques sur une réduction du coût de l'énergie, on constate que l'offre d'énergie à un prix peu élevé est sans doute un puissant stimulant du développement économique, mais que d'autres conditions sont également nécessaires pour permettre d'accroître, sur une large échelle, la consommation d'énergie. A ce sujet, il est très instructif de passer rapidement en revue les expériences faites aux États-Unis entre 1900 et 1950. Au cours de ces années-là, l'énergie coûtait beaucoup moins cher aux États-Unis que dans la plupart des autres pays, peut-être n'était-elle même nulle part au monde meilleur marché; et, bien que la demande en charbon, en pétrole et en gaz n'ait cessé d'augmenter, tant pour la production nationale que pour l'exportation, le prix réel de l'énergie est resté bas. Dans ces conditions favorables, la consommation d'énergie par personne a rapidement augmenté, beaucoup plus rapidement qu'en Europe occidentale, ce qui a incontestablement facilité un accroissement rapide de la productivité individuelle. Il faut dire, toutefois, que la consommation d'énergie a augmenté un peu moins rapidement que le produit national brut, mais si l'on tient compte du meilleur rendement de l'énergie utilisée, il serait probablement juste de dire que la consommation effective d'énergie s'est accrue plus vite que la production nationale.

Sans aucun doute, cet accroissement rapide des quantités d'énergie disponibles à bas prix permet d'expliquer, dans une large mesure, l'essor économique des États-Unis pendant la période envisagée. Mais, si l'on examine le rapport du coût de l'énergie

au coût total de la production, on constate que c'est seulement dans un très petit nombre de branches de l'activité économique que le coût de l'énergie a joué un rôle vraiment important. De plus, l'accroissement rapide des quantités d'énergie disponibles et de la consommation d'énergie ont exigé, l'un et l'autre, des capitaux considérables, qui se sont trouvés disponibles grâce à un taux relativement élevé des investissements. On peut dire, pour conclure, que les grandes quantités d'énergie offertes jointes aux conditions dans lesquelles celles-ci sont devenues disponibles ont été à la fois cause et effet des progrès techniques rapides qui ont caractérisé le développement économique des États-Unis.

Le prix de l'énergie aux États-Unis

Le mouvement des prix de l'énergie aux États-Unis au cours de la première moitié du siècle présente les caractéristiques suivantes : les prix du charbon sont restés stables jusqu'à la première guerre mondiale, ils ont atteint un niveau plus élevé entre 1920 et 1940 et accusé une nouvelle hausse pendant la deuxième guerre mondiale et la période qui suivit. Les prix du pétrole ont suivi une courbe correspondante, mais moins accentuée : les prix du gaz naturel ont par contre baissé régulièrement et commencé à monter il y a seulement une dizaine d'années; les prix de l'électricité ont suivi ceux du gaz naturel, mais au cours des dernières années leur tendance a été à la stabilité plutôt qu'à la hausse.

Si l'on divise les prix en question par l'indice des prix de gros de tous les produits aux États-Unis, de manière à éliminer l'influence des mouvements généraux des prix, on obtient, pour chaque catégorie, les courbes caractéristiques reproduites à la figure 4. Ainsi exprimés, les prix du charbon et du pétrole accusent une beaucoup plus grande stabilité, avec une légère tendance à la hausse pour le charbon. Le gaz naturel et l'électricité, par contre, accusent une tendance marquée à la baisse (l'électricité ne figure pas dans la figure 4, mais dans le tableau F de l'annexe). La moyenne des prix ainsi ajustés de tous les combustibles minéraux reste stable de 1900 jusqu'au début de la première guerre mondiale, date à laquelle elle accuse une brusque hausse de 50 pour cent, puis se maintient à un niveau relativement stable pendant trente-cinq ans *.

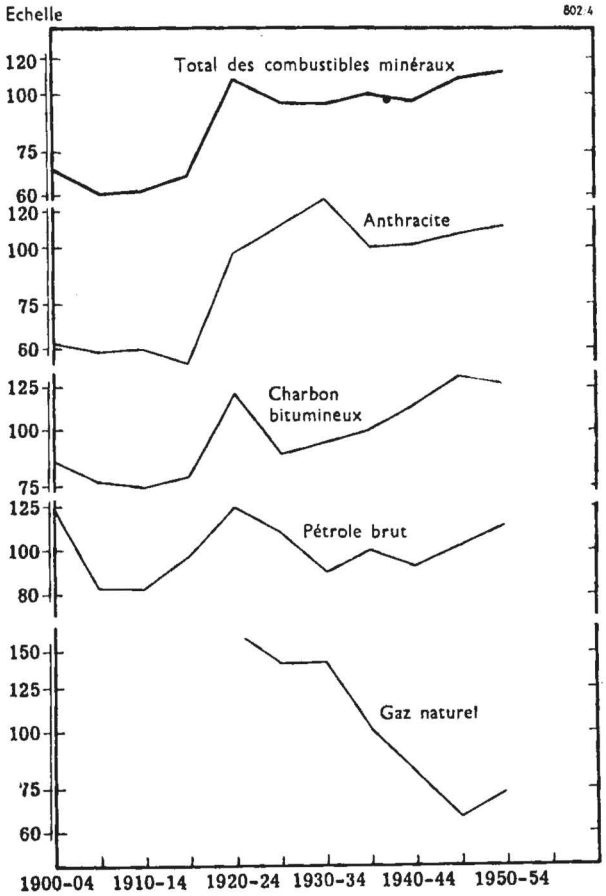


Figure 4. — Prix relatifs des combustibles minéraux aux États-Unis (1935-1939 = 100).

Source : Bureau of Mines (prix à la mine ou au puits, rapporté à l'indice des prix de gros).

Pendant toute cette période, les prix de l'énergie aux États-Unis ont été plus bas que dans la plupart des autres pays. Cela est dû sans doute avant tout à l'abondance des richesses naturelles. Les réserves de charbon des États-Unis sont considérables, d'excellente qualité, facilement accessibles, les filons sont puissants et faciles à exploiter. Les réserves de pétrole et de gaz présentent aussi divers avantages du point de vue économique. Le gaz avait l'avantage supplémentaire de se trouver disponible en très grandes quantités grâce à la prospection et à l'exploitation du pétrole, mais, au début, on l'a plutôt considéré comme un déchet en raison du lieu de production assez peu favorable, jusqu'au moment où une grande industrie a pris assez soudainement l'initiative de transporter le gaz par pipeline vers les centres urbains. C'est seulement lorsque l'excédent de disponibilités a été épuisé que les prix ont commencé à monter en raison d'une demande croissante. L'électricité a coûté moins cher aux États-Unis que dans la plupart des autres pays du monde, en raison du prix peu élevé du combustible et grâce au développement des tech-

* Il y a lieu de noter que le mode de pondération appliqué au calcul de ces prix moyens (le prix de chaque combustible a été pondéré pour chaque année par la proportion qu'il représente en pouvoir calorifique dans le total) convient également à une étude des mouvements des prix moyens portant sur une longue période. En employant un mode de pondération par année fixe, c'est-à-dire en pondérant chaque année le prix de chaque combustible par la quantité de combustible d'une seule année de base, on obtiendrait des courbes différentes suivant l'année de base choisie. La stabilité des prix moyens de l'énergie (évaluée en prix constants) depuis 1920, qui ressort de la figure 4, donne une idée assez juste de l'évolution réelle.

niques modernes. En outre, des programmes officiels, souvent à objectifs multiples et à financement mixte, programmes qui visaient surtout à diminuer le coût de l'énergie et à en accroître la consommation, ont souvent porté sur l'exploitation de la force hydraulique dans des régions où cette exploitation était très rentable.

L'abondance des capitaux disponibles pour de nouveaux investissements et le faible loyer de l'argent ont influé sur toute cette évolution, tendant à faire baisser les prix (ou à freiner la tendance à la hausse). La perspective d'un essor économique général a poussé les bailleurs de fonds à investir d'abord des centaines de millions, puis des milliards chaque année, pour accroître la capacité de production et améliorer le rendement des entreprises. Par suite d'un développement économique rapide et généralisé, on a toujours disposé des capitaux et des débouchés nécessaires pour absorber les flots d'énergie produits. Le gouvernement est intervenu parfois, notamment dans la région de la TVA (Tennessee Valley Authority), à la fois pour fournir de l'énergie et pour permettre le développement économique nécessaire à sa consommation. Il résulte de tout ceci que pendant toute cette période d'essor économique, le prix de l'énergie est resté faible par rapport aux disponibilités financières des consommateurs.

En conclusion, on peut dire que le prix de l'énergie est resté bas aux États-Unis par rapport aux autres pays du monde et au revenu national. Ce prix est, de plus, resté très stable. La demande a toujours été satisfaite sur le marché intérieur, car on disposait à la fois, pour assurer l'expansion de l'énergie, de ressources naturelles et de capitaux abondants.

Consommation d'énergie

Sous l'influence de nombreux facteurs favorables, notamment du faible niveau des prix, la consommation d'énergie s'est accrue rapidement aux États-Unis. La figure 5 indique le rendement de tous les combustibles minéraux énergétiques considérés dans leur ensemble et séparément. La consommation d'énergie électrique n'est pas indiquée dans cette figure, mais dans le tableau G de l'annexe; cette consommation s'est accrue plus rapidement que celle de toutes les autres formes d'énergie. En gros, on peut admettre que la consommation d'énergie électrique double tous les dix ans aux États-Unis.

Ce serait une erreur de croire que les différences de courbes accusées par chaque combustible sont dues uniquement à la substitution d'une source d'énergie calorifique à une autre; car cette substitution elle-même reflète dans une large mesure le processus de l'évolution économique. Ainsi l'extension prise par la fabrication de produits chimiques dérivés du pétrole, qui a abouti à un nombre considérable de produits nouveaux, ne se reflète, sur le graphique, que par une variation relativement

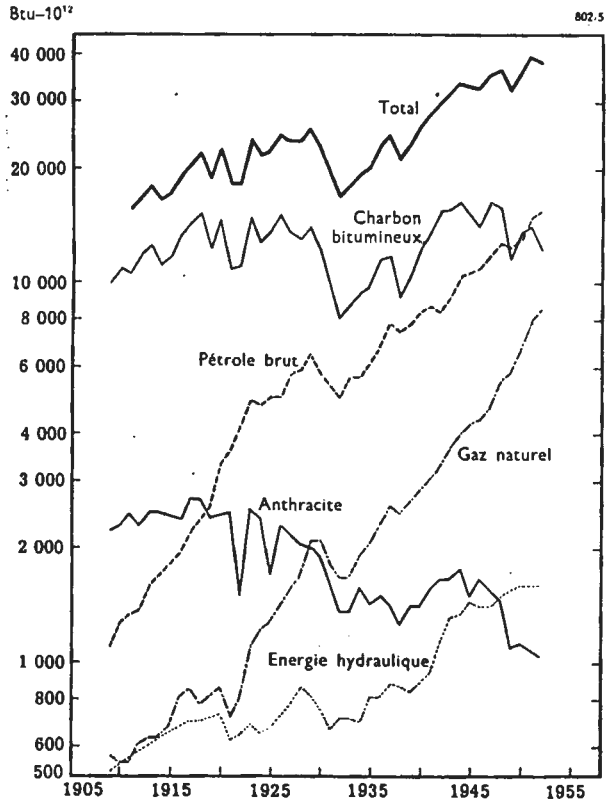


Figure 5. — Sources de l'énergie consommée aux États-Unis.

Sources : H. J. Barnett, Bureau of Mines, I. C. 7582, octobre 1950; *1952 Minerals Yearbook.*

faible de la courbe calorifique du pétrole. Qu'on songe aussi à l'approvisionnement en eau des terres arides, ou bien à l'emploi presque exclusif des moteurs diesel à la place des anciennes locomotives et à l'impulsion nouvelle donnée aux chemins de fer en l'espace de dix à quinze ans à peine — toutes transformations fondamentales de la structure économique, dont cette figure rend compte.

L'énergie comme facteur du coût de production

Le prix de l'énergie représente sans doute une fraction assez faible du coût total de l'installation nécessaire à son utilisation ou du coût total de la production. Il en résulte que même si les variations du prix de l'énergie sont fortes, elles n'exerceront qu'une faible influence sur le coût global. Les tableaux 5 et 6 des pages suivantes montrent, le premier, le rapport du coût de l'énergie au total de la valeur ajoutée dans les industries manufacturières et au total du produit national brut de 1899 à 1952; et l'autre, le rapport du coût de l'énergie à la valeur ajoutée par la transformation dans certaines branches des industries de transformation.

Cependant, même de faibles différences de prix peuvent avoir leur importance, car l'intérêt économique, si faible soit-il, influencera toujours les

Tableau 5

Rapport entre l'énergie consommée et la valeur ajoutée dans les industries de transformation, et rapport entre l'énergie consommée et le produit national brut des États-Unis, 1899-1952

(Valeurs en milliards de dollars)

Année	Industries de transformation			Total de l'économie		
	Coût de l'énergie consommée (1)	Valeur ajoutée (2)	Pourcentage du coût de l'énergie dans la valeur ajoutée (3)	Coût de l'énergie consommée (4)	Produit national brut (5)	Pourcentage du coût de l'énergie dans le produit national brut (6)
1952	4,8	108,5	4,4	23,6 [b]	346,1	6,8
1950	4,2	89,7	4,7	19,8	285,1	6,9
1947	3,3	74,4	4,5	15,3	232,2	6,6
1939	1,3	24,5	5,4	7,1	91,1	7,8
1929	1,6 [a]	30,6	5,2	7,4	104,4	7,1
1919	1,4 [a]	23,8	6,0	5,2	87,1	6,0
1909	0,5 [a]	8,2	6,2	1,7	33,1	5,1
1899	0,2	4,6	4,5	0,8	18,0	4,4

[a] Chiffres pondérés par V. E. Spencer, États-Unis, Bureau of the Census — de manière à éviter les répétitions.

[b] Estimation basée sur les données fournies par le Bureau of Mines, l'American Petroleum Institute, l'American Gas Association, et l'Edison Electric Institute.

Sources : (1), (2) États-Unis, Census Bureau, *Censuses of Manufactures* et *Annual Surveys of Manufactures*, 1950 et 1952. — (4) Données fournies par V. E. Spencer d'après les publications du Bureau of the Census et du Bureau of Mines. — (5) Les chiffres pour 1929 à 1952 sont empruntés au *National Income Supplement to Survey of Current Business* de 1954, États-Unis, Département du Commerce, Washington; ceux pour 1909 à 1919, à l'*Economic Almanac* de 1954, p. 490.

Tableau 6

Coût de l'énergie dans les industries de transformation aux États-Unis par principaux groupes d'industries, en 1947

(Valeurs en millions de dollars)

Groupes d'industries	Valeur ajoutée par la transformation	Coût du combustible et de l'énergie électrique	
		Total	En pourcentage de la valeur ajoutée
Total des industries de transformation	74 426	3 332	4,5
Alimentation et produits similaires	9 025	279	3,1
Industries du tabac	641	6	0,9
Industries textiles	5 341	166	3,1
Confection et articles similaires	4 443	30	0,7
Bois et produits similaires, à l'exception des meubles	2 497	68	2,7
Meubles et accessoires mobiliers	1 378	22	1,6
Papier et produits similaires	2 875	198	6,9
Imprimeries et maisons d'édition	4 269	35	0,8
Produits chimiques et produits similaires	5 365	297	5,5
Pétrole et charbon	2 015	97	4,8
Caoutchouc	1 303	46	3,5
Cuir et articles en cuir	1 533	21	1,4
Industries de la pierre, céramique et verrerie	2 306	258	11,2
Industries métallurgiques	5 765	1 317	22,8
Industries de transformation des métaux	4 921	111	2,3
Machines (à l'exception des machines électriques)	7 812	147	1,9
Machines électriques	3 894	64	1,6
Matériel de transport	5 869	125	2,1
Fabrication d'instruments et d'articles similaires . .	1 080	12	1,1
Divers	2 090	33	1,6

Source : D'après le *Census of Manufactures*, 1947, volume 1.

décisions à prendre sur la marche des affaires et le choix des techniques. De plus, tout accroissement de la consommation d'énergie, accroissement provoqué par un prix avantageux, tend nécessairement à entraîner une augmentation des capitaux investis, l'adoption de nouvelles méthodes et une économie de main-d'œuvre, qui peuvent être à l'origine de nouveaux changements encore. Enfin, dans certains secteurs, notamment dans les transports ou, comme l'indique le tableau 4, dans l'industrie métallurgique, dans celle de la pierre, dans l'industrie de la céramique ou dans les verreries, l'énergie représente un pourcentage très élevé du coût de production global.

Électricité

La simplification excessive qui consiste à considérer l'énergie simplement d'après son pouvoir calorifique est sans doute particulièrement dangereuse si on l'applique à l'énergie électrique. Il semble en effet qu'il existe, entre l'accroissement de la consommation d'énergie électrique et le développement économique, un lien bien plus étroit qu'entre ce développement et l'augmentation des quantités de combustible minéral consommées. L'électricité semble exercer une influence toute particulière sur la fabrication de nouveaux produits, sur les nouveaux modes de production et sur les nouvelles sources de matériaux. Elle semble également liée d'une manière particulièrement étroite à toutes les innovations de notre époque. La possibilité de subdiviser l'énergie et de la contrôler facilement sous un très petit volume la rend particulièrement apte à actionner des appareils ménagers et à permettre toutes sortes d'améliorations techniques dans les demeures privées, où elle devient la bonne à tout faire. Aussi, peut-on dire que c'est elle qui a, dans une large mesure, permis aux femmes mariées de s'adonner à d'autres activités, et qui explique aussi la disparition presque complète des domestiques privés aux États-Unis. Cette opinion èst d'ailleurs assez subjective, et l'on pourrait sans doute soutenir également qu'il existe un lien particulièrement étroit entre les carburants et autres produits pétroliers, d'une part, et les innovations de l'époque contemporaine d'autre part!

Différences du prix de l'énergie suivant les régions

Les États-Unis sont un vaste pays dont les régions diffèrent nettement au point de vue économique (certaines se trouvent loin des centres de production des combustibles) et se sont développées à des périodes différentes. Le prix des combustibles y varie beaucoup suivant les états et les régions; c'est ainsi que le prix moyen du combustible consommé par les centrales électriques en 1953 a varié entre 0,087 dollar par million de Btu au Texas et 1,12 dollar pour le pétrole au Nevada.

Si l'on compare le revenu par personne dans un état et le prix moyen du combustible en 1952, on ne constate pas de rapport inversement proportionnel entre les deux (voir le tableau H de l'annexe), et l'on aurait tort d'imaginer qu'il existe un lien quelconque entre eux. Le processus du développement économique est très compliqué et ne peut être représenté par une formule selon laquelle un facteur variable, « le revenu par personne », serait simplement fonction d'un autre facteur variable, le « prix moyen de l'énergie ».

L'enquête menée par Schurr et Marschak, relative à l'effet produit par une réduction du prix de l'énergie des centrales électriques sur un certain nombre d'industries fortes consommatrices d'énergie, a permis de constater que, dans certains cas, cette réduction pouvait avoir pour effet une modification radicale des techniques appliquées dans certaines industries très spéciales et un changement d'emplacement de certaines usines [6]. Mais les auteurs ont aussi constaté qu'un grand nombre d'autres conditions et d'autres influences agissent également et que celles-ci sont, au total, plus décisives que le prix de l'énergie lui-même. Dans son enquête sur les effets économiques probables d'une diminution du coût de l'énergie produite par les centrales de certains états des États-Unis, où le revenu national est plutôt inférieur à la moyenne, Barnett estime que la baisse du coût de l'énergie n'aurait le caractère d'un stimulant que si un certain nombre d'autres facteurs favorables se trouvaient également réunis [10].

Conclusion

Il semble bien qu'aux États-Unis comme ailleurs, l'énergie bon marché ait été l'un des éléments qui ont facilité l'essor économique. L'offre de grandes quantités d'énergie à bas prix, et surtout d'énergie électrique, a certainement eu une grande influence sur le choix de l'emplacement de certaines industries de premier plan, un certain effet sur la structure de l'industrie elle-même et, probablement par là, sur le rythme du développement industriel en général. Il est donc certain que la possibilité de se procurer de grandes quantités d'énergie à des prix non prohibitifs a été un des facteurs essentiels du progrès économique aux États-Unis. Mais la leçon que les pays qui sont encore au premier stade du développement économique peuvent tirer de cet exemple historique est la suivante : l'énergie elle-même est un facteur essentiel, mais son prix n'influe sur le développement économique d'un pays que si d'autres facteurs de développement, et notamment des conditions satisfaisantes d'investissement de capitaux, se trouvent réunis.

L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE ET LES BESOINS EN ÉNERGIE

De l'étude qui précède, on peut tirer les conclusions suivantes :

Les besoins du monde en énergie peuvent avoir doublé en 1975 et quadruplé en l'an 2000; peut-être

augmenteront-ils plus rapidement encore. Leur accroissement dépendra essentiellement de certains facteurs, notamment du taux d'accroissement de la production mondiale (conditionné lui-même par l'augmentation de la population et celle de la productivité individuelle), du degré d'industrialisation, du rendement que pourront atteindre la production et l'utilisation de l'énergie, ainsi que du climat des régions qui se développent au point de vue économique.

Les différences du prix de l'énergie suivant les régions ont diminué depuis un siècle en raison de changements survenus dans l'importance relative de certains matériaux énergétiques, de la découverte de nouvelles sources d'énergie et d'une amélioration des transports. Toutefois, ces différences de prix restent appréciables.

Le prix peu élevé de l'énergie et l'abondance de l'offre sont certainement des stimulants du développement économique, qui sera toujours freiné par des prix élevés. Mais le prix de l'énergie ne représente toutefois qu'une fraction relativement peu importante du coût total de la production dans bien des branches de l'activité économique, et l'apport d'énergie n'est qu'une condition, parmi d'autres, du développement économique.

Les secteurs de l'activité économique qui produisent et consomment de l'énergie sont de gros consommateurs de capitaux et nécessiteront, dans la plupart des pays sous-développés, un apport très élevé de devises étrangères. Dans ces conditions, le développement économique d'un pays ne pourra être assuré par la seule offre d'énergie à bon marché que si la formation de capitaux s'y fait à un rythme suffisant et si ce pays peut se procurer des devises dans des conditions satisfaisantes.

Disponibilités énergétiques assurées par les combustibles classiques

Avant d'examiner quelles pourront être les conséquences du développement des sources d'énergie nucléaire, dans le cadre des besoins croissants en énergie, il est utile d'examiner brièvement certains aspects des rapports existant entre les besoins et les quantités d'énergie fournies par les combustibles classiques. Nous en savons assez sur les réserves de charbon, de pétrole, de gaz et d'énergie hydraulique pour affirmer, avec une certaine assurance, que les sources classiques d'énergie pourront couvrir, *à un certain prix*, tout accroissement possible de la demande d'énergie dans le monde, au cours des cinquante prochaines années. Il est cependant vraisemblable, si tel est le cas, que les prix de l'énergie, sur le marché mondial, augmenteront dans une certaine mesure sous la pression d'une demande toujours plus forte. Certaines régions, où ce prix a été traditionnellement bas, doivent certainement envisager l'éventualité d'une hausse. La demande se portera toujours plus sur le pétrole qui est, de tous les matériaux énergétiques, celui dont le transport d'un pays à l'autre est le plus facile, et les différences de prix de l'énergie suivant les régions tendront à se maintenir.

Les États-Unis, dont l'économie est avant tout alimentée par le pétrole et le gaz (ces deux produits fournissent 62 pour cent de l'énergie consommée aux États-Unis) ont bénéficié jusqu'à présent de prix extrêmement bas. Il y a, semble-t-il, des raisons de penser que, dans l'avenir, le coût de l'énergie sera plus élevé dans ce pays. Le prix du gaz, qui couvre à lui seul 20 pour cent des besoins énergétiques des États-Unis, est monté depuis dix ans et continuera probablement à monter, et il semble bien que la prospection du pétrole coûte actuellement plus cher aux États-Unis [1].

Bien que ce pays dispose de fortes réserves de charbon facile à extraire, la tendance des salaires et des prix dans ce secteur est telle qu'il semble peu probable que le charbon puisse freiner la tendance à la hausse des prix des autres combustibles. L'énergie hydraulique ne couvre qu'une fraction très faible des besoins en énergie des États-Unis et le nombre des sites qui pourront encore être exploités à bon marché est limité.

Cependant, l'existence de très importantes réserves de schiste bitumineux, qui peuvent être converties en produits pétroliers à un prix très peu supérieur à celui des produits tirés du pétrole brut, permettra, à un moment donné, de limiter la tendance à la hausse du prix du pétrole produit dans le pays. Les importations de pétrole peuvent agir dans le même sens, d'une manière plus immédiate. Depuis la fin de la guerre, en effet, les États-Unis sont devenus importateurs de quantités appréciables de pétrole [un million de barrels (159 millions de litres) environ par jour pour une consommation totale de 7 $^1/_2$ millions (environ 1 milliard 200 millions de litres)]. A l'heure actuelle, il est bien entendu que les importations doivent « compléter mais non remplacer » la production nationale, mais cette formule pourra difficilement résister, semble-t-il, s'il se produit une forte augmentation du coût de production et du prix de vente du pétrole. La Commission Paley a prévu, en effet, qu'au cours des 25 prochaines années, les États-Unis deviendront nettement plus dépendants du pétrole étranger, notamment du pétrole du Moyen-Orient [1]. Si les combustibles classiques restent la principale source d'énergie, cette tendance s'accentuera à la longue.

Le fait que les États-Unis deviennent importateurs de quantités appréciables de pétrole du Moyen-Orient pourra influer sur le prix de l'énergie en Europe occidentale. Celle-ci, en effet, dispose de réserves considérables de charbon et a été, traditionnellement, comme les États-Unis, une région où l'énergie était disponible en grande quantité et à un prix relativement bas. L'économie européenne a été et reste encore fondée avant tout sur le charbon. En 1953, le charbon et le lignite fournissaient à l'Europe occidentale presque les trois quarts de l'énergie dont elle avait besoin, mais

cette situation était en voie d'évolution rapide. Entre 1937 et 1953, en effet, les besoins de cette région ont augmenté de 22,5 pour cent et la moitié de cette augmentation a été couverte par le pétrole, 6 pour cent par le charbon et le lignite et le reste par l'énergie hydraulique [11].

On admet en général que la production de charbon n'augmentera plus beaucoup en Europe occidentale, et même que les taux actuels de production ne pourront être maintenus à la longue qu'à un prix toujours plus élevé. Le potentiel hydraulique est nettement limité, eu égard à l'ampleur qu'atteindra, suivant les prévisions, la demande d'énergie. Il en résulte que si l'Europe occidentale doit couvrir ses besoins croissants en énergie avec du combustible classique, elle devra surtout faire appel au pétrole. Or, bien que les découvertes récentes de pétrole et de gaz en Europe soient très prometteuses, il faut surtout compter sur la production du Moyen-Orient.

Le prix du pétrole brut en provenance du Moyen-Orient a été fixé ces dernières années d'après le prix du pétrole livré dans les ports de la côte orientale des États-Unis et en provenance du golfe du Mexique et des Antilles. Si les États-Unis deviennent de gros importateurs du pétrole brut du Moyen-Orient, les prix f. o. b. dans le golfe Persique continueront sans doute à être fixés d'après les prix payés dans les ports de la côte orientale des États-Unis, région qui représente le débouché rentable le plus éloigné pour le Moyen-Orient*.

Même si les États-Unis n'importent pas des quantités considérables de pétrole du Moyen-Orient, les pays sous-développés d'Asie et d'Afrique risquent d'en disputer l'acquisition à l'Europe occidentale. En effet, par nature, le Moyen-Orient est plutôt destiné à servir de fournisseur aux territoires en question, et si le revenu de ces régions s'élève d'environ 4 pour cent par an, comme nous l'avons prévu, leur demande en énergie deviendra forte avant longtemps. Si ces demandes doivent être satisfaites au moyen de combustible classique, les conditions auxquelles on pourra se procurer le pétrole du Moyen-Orient présenteront une importance capitale à la fois pour les régions actuellement sous-développées, l'Europe occidentale et les États-Unis.

Il ressort du tableau 7 que, depuis 20 ans, les transports de charbon d'un pays à l'autre ont diminué presque partout, alors que les transports de pétrole ont augmenté. L'Amérique du Nord et l'Europe sont devenues de gros importateurs nets de pétrole, tandis que l'Amérique latine et l'Asie sont devenues de gros exportateurs nets. Il est probable qu'au cours des prochaines décennies le pétrole occupera de beaucoup le premier rang parmi les combustibles classiques transportés d'un pays à l'autre.

Cette étude rapide et succincte fait ressortir certains effets probables des rapports entre l'approvisionnement en énergie de source classique et l'accroissement de la demande. Le prix de revient de l'énergie tendra probablement à monter aux États-Unis et en Europe occidentale et même si les importations de pétrole permettent de freiner cette tendance, elles ne pourront pas la renverser. Les échanges internationaux et interrégionaux

Tableau 7

Échanges interrégionaux des sources commerciales d'énergie, 1929, 1937 et 1950 [a]

(En millions de tonnes d'équivalent de charbon)

	Combustibles solides	Combustibles liquides	Total
Amérique du Nord			
1929	2,0	0,1	— 2,1
1937	— 0,4	8,2	7,8
1950	2,3	— 61,1	— 58,8
Europe			
1929	21,0	— 21,1	— 0,1
1937	16,7	— 40,3	— 23,6
1950	10,5	— 71,6	— 61,1
Océanie			
1929	—	— 2,9	— 2,9
1937	0,1	— 4,5	— 4,4
1950	— 0,6	— 10,1	— 10,7
Divers [b]			
1929	— 9,9	— 2,3	— 12,2
1937	— 4,9	— 6,4	— 11,3
1950	— 8,8	— 20,3	— 29,1
Afrique			
1929	— 4,9	— 3,1	— 8,0
1937	— 5,0	— 7,8	— 12,8
1950	0,7	— 14,6	— 13,9
Amérique latine			
1929	— 7,3	26,4	19,1
1937	— 6,2	38,0	31,8
1950	— 2,8	85,2	82,4
Asie			
1929	— 0,9	2,9	2,0
1937	— 0,3	12,8	12,5
1950	— 1,3	92,5	91,2

[a] ONU, Série J. Chiffres non précédés d'un signe = exportations nettes (après déduction des importations).
Chiffres précédés de — = importations nettes (après déduction des exportations).

[b] On n'a tenu compte, pour cette catégorie, que des importations et des exportations expressément comptabilisées. C'est ici que l'on a inclus le commerce avec l'U.R.S.S.

* La question de savoir s'il serait possible de faire baisser le prix du pétrole brut en provenance du Moyen-Orient à un niveau très inférieur au niveau actuel est trop complexe pour être discutée ici. (Elle a été examinée dans un rapport récent de la Commission économique pour l'Europe : « Le prix des produits pétroliers en Europe occidentale », E/ECE/205, mars 1955.) Tout ce qu'on peut dire, c'est que ce problème soulève d'énormes difficultés.

de matériaux énergétiques, qui portent déjà en majeure partie sur le pétrole, porteront de plus en plus, et presque exclusivement, sur ce produit. Si les États-Unis, l'Europe occidentale et les régions en voie de développement d'Asie et d'Afrique dépendent tous, pour leurs importations, du pétrole du Moyen-Orient, la consommation s'en accroîtra, au cours des 25 prochaines années, à un rythme annuel très rapide, même par rapport aux immenses réserves dont disposent ces régions. Enfin, même si le développement du commerce du pétrole a pour effet de réduire encore les différences de prix de l'énergie, suivant les régions, ces différences demeureront cependant appréciables tant que les combustibles classiques resteront la source principale de l'énergie.

Le rôle possible de l'énergie nucléaire

C'est en s'inspirant de ce qui précède qu'on peut se faire une idée du rôle que l'énergie nucléaire sera appelée à jouer pour couvrir les besoins en énergie. Nous avons déjà signalé qu'au cours de la période envisagée, le coût de l'énergie nucléaire pourrait tomber sensiblement au-dessous des prix les plus bas pratiqués actuellement pour l'énergie de source classique. Dans ce cas, de vastes perspectives seraient ouvertes, qui dépassent complètement le champ de la présente étude. Mais si, au contraire, comme il paraît probable, le prix de revient de l'énergie nucléaire reste dans les limites relativement larges qui existent actuellement entre les prix assez bas payés dans certains pays et les prix assez élevés payés dans d'autres pour l'énergie de sources classiques, en marquant plutôt une tendance à la baisse, il sera alors permis de s'inspirer des expériences faites avec les combustibles classiques.

Au point de vue économique, ce qui caractérise surtout l'énergie nucléaire, c'est le coût négligeable du transport du combustible. Il en résulte donc un grand avantage pour les régions où l'énergie est actuellement coûteuse, à cause de leur éloignement des lieux de production des combustibles classiques. Bien des régions sous-développées du monde, qui sont mûres, à l'heure actuelle, pour le développement économique, mais manquent de combustibles classiques, se trouvent en effet éloignées des centres de production. Si ces pays arrivent à disposer des capitaux et des devises étrangères nécessaires, l'énergie nucléaire pourrait contribuer fortement à leur développement.

C'est sans doute dans les régions où l'énergie coûte cher et dans les pays riches en capitaux que l'installation de centrales nucléaires sera immédiatement le plus facile. Nous avons souligné qu'aux États-Unis et au Canada par exemple, le prix de l'énergie varie beaucoup d'une région à l'autre. Puisque ces deux pays disposent de capitaux à bon marché et qu'il n'y a pas pour eux de difficultés de change, il semble que la construction de centrales nucléaires dans les régions de ces pays où l'énergie coûte cher serait plus facilement réalisable que dans les pays sous-développés où l'énergie coûte également cher, mais où les capitaux sont moins abondants et où les devises sont rares. Les centrales nucléaires exigent en effet de très gros capitaux mais fonctionnent ensuite à peu de frais, de sorte que la question des capitaux disponibles vient ici au premier plan.

Si l'on laisse de côté les régions où l'énergie coûte cher, le rôle joué par l'énergie nucléaire dans les autres dépendra sans doute de deux facteurs : la hausse du prix de revient de l'énergie fournie par les sources classiques et la baisse du prix de revient de l'énergie nucléaire elle-même. Si la même évolution se produit pour l'énergie nucléaire que pour les autres techniques nouvelles, nous pouvons admettre qu'avec le temps il sera possible de produire cette énergie à un prix beaucoup plus faible que nous ne l'imaginons actuellement. Nous avons vu aussi qu'il y a tout lieu de supposer que des facteurs importants influeront sur le coût de l'énergie de source classique et sur les quantités d'énergies produites à partir de ces sources. Cette perspective a paru suffisamment importante pour décider le Gouvernement du Royaume-Uni à mettre sur pied un vaste programme pour le développement de l'énergie nucléaire*, et un programme d'une ampleur égale est actuellement en voie d'exécution aux États-Unis.

Même si, pendant la période étudiée ici, il n'est pas possible de produire l'énergie nucléaire à un prix plus bas que l'énergie produite par les bonnes centrales alimentées au charbon, l'expansion des facilités offertes par l'énergie nucléaire pourra jouer un rôle important en freinant une hausse, autrement inévitable, du coût de l'énergie de source classique.

Si nous nous bornons à voir dans l'énergie nucléaire une source additionnelle d'énergie, susceptible de réduire d'une manière appréciable le prix de l'énergie dans les régions où celui-ci est élevé et de freiner la tendance à la hausse du prix de l'énergie fournie par les combustibles classiques, quel pourra être le rôle joué par cette énergie dans le développement économique ?

Bien que le prix de l'énergie ne représente qu'une fraction modeste du coût total de la production industrielle, le rôle joué par l'énergie nucléaire peut être important et l'on peut même dire que

---

* *Cf.* « Un programme pour le développement de l'énergie nucléaire », présenté au Parlement par le Lord Président du Conseil et par le Ministre des combustibles et de l'énergie, Cmd. 9389, 1955, p. 1 : « Il paraît maintenant possible d'utiliser dans le domaine commercial la fission nucléaire comme source d'énergie pour actionner des centrales électriques. Cette possibilité arrive précisément à une époque où la demande d'énergie, et surtout d'énergie électrique, est considérable et ne cesse d'augmenter, ce qui nous oblige à exploiter toujours plus intensément nos ressources de charbon et rend urgente la recherche de nouvelles source d'énergie. »

ses possibilités sont énormes. L'énergie nucléaire offre en effet un moyen d'affaiblir encore, et même radicalement, la dépendance dans laquelle se trouve, nous l'avons constaté, l'essor industriel par rapport aux diverses sources d'énergie. L'énergie nucléaire fournie en grande quantité et à des prix moins élevés facilitera beaucoup l'essor économique des pays qui sont mûrs pour ce développement, mais ne disposent pas de matériaux énergétiques classiques. Pour le monde dans son ensemble, cette source d'énergie nouvelle, pratiquement illimitée, et à un prix compétitif, a des chances de devenir, avec le temps, un facteur d'une importance inestimable.

Pour tirer pleinement parti du potentiel que représente l'énergie nucléaire, il faut accélérer les travaux techniques nécessaires pour en réduire le prix de revient et trouver le moyen de la mettre à la disposition des régions sous-développées du monde. Il appartient avant tout, sinon uniquement, aux pays industriellement les plus évolués, d'accélérer les travaux et les recherches techniques. Mais c'est aux pays sous-développés eux-mêmes, sinon rien qu'à eux, qu'il appartient de fournir les capitaux et les devises nécessaires à l'utilisation de cette nouvelle source d'énergie. Il va de soi que des prêts ou des subventions étrangers peuvent leur apporter une aide, mais la plus grande partie des investissements de base de capitaux nécessaires pour assurer une expansion de la production d'énergie et son utilisation doit être fournie, de toute évidence, par l'épargne nationale.

BIBLIOGRAPHIE

1. PMPC, *Resources for freedom*, vol I, p. 103 et 122.
2. CEE, *Situation respective du charbon et des produits pétroliers sur le marché des combustibles de l'Europe Occidentale*, p. 19.
3. Frankel P. H., *The role of fuel oil in Europe*, étude soumise au quatrième Congrès mondial du pétrole, juin 1955, Rome.
4. Stigler G. H., *Trends on output and employment*, National Bureau of economic research, 1947, New York.
5. *Coal Age*, novembre 1951, vol. 56, n° 11.
6. Schurr S. H. et Marschak J., *Economic aspects of atomic power*, Princeton University Press, 1950.
7. Barnett H. J., *Energy uses and supplies, 1939, 1947, 1965*, U. S. Bureau of Mines, 1950, I. C. 7582.
8. CEE, *Étude sur la situation économique de l'Europe en 1951.*
9. CEE, *Récent développement dans la situation de l'énergie électrique en Europe (1951-52)*, étude préparée par la Section de l'énergie électrique, E/ECE/160, E/ECE/EP/129, mars 1953, p. 35.
10. Barnett H. J., *Atomic energy in the US economy : a consideration of certain industrial, regional and economic development aspects*, thèse de doctorat en philosophie, août 1952, Université de Harvard, Cambridge, Massachusetts.
11. ONU, *Situation respective du charbon et des produits pétroliers noirs sur les marchés des combustibles de l'Europe occidentale*, E/ECE/191, 26 août 1954.

ANNEXE

Tableau A

Estimation des besoins bruts en énergie

(10^{12} kWh en équivalent d'électricité)

Taux d'accroissement	Quantités disponibles en 1952	Besoins probables	
		1975	2000
3 1/2 - 4 pour cent (ONU-Guyol). .	29,0	64,0 - 71,6	151,2 - 191,6
3 pour cent (P M P C) . . .	29,0	57,3	120,5
1 1/2 pour cent (constante de consommation par personne). .	29,0	40,8	59,2

Sources : Voir le texte, 1re partie; les chiffres pour 1952 sont empruntés à N. B. Guyol, *Besoins du monde en énergie en 1975 et en l'an 2000;* voir mémoire P/902, Actes de la présente Conférence, séance 2.1, vol. I.

Tableau B

Consommation d'énergie comparée au revenu national, 1952

Comparaison entre le revenu national par personne, exprimé en dollars des États-Unis, et la consommation d'énergie commerciale et non commerciale, par personne, dans certains pays

Pays	Revenu national par personne (en dollars des États-Unis)	Consommation d'énergie par personne (en tonnes d'équivalent de charbon)
Union Sud-Africaine	270 [a]	2,12
Allemagne	461	3,14
Australie	912 [a]	3,82
Autriche	348	1,95
Belgique et Luxembourg . .	683	3,80
Brésil	183	0,78
Birmanie	43 [a]	0,27
Canada	1 284	7,55

TABLEAU B *(fin)*

Consommation d'énergie comparée au revenu national, 1952

Comparaison entre le revenu national par personne, exprimé en dollards des États-Unis, et la consommation d'énergie commerciale et non commerciale, dans certains pays.

Pays	Revenu national par personne (en dollars des États-Unis)	Consommation d'énergie par personne (en tonnes d'équivalent de charbon)
Ceylan	109	0,35
Chili	468	1,11
Colombie	219	0,59
Cuba	386	1,53
Danemark	725	2,27
Équateur	144	0,33
États-Unis	1 857	8,18
Finlande	523	1,83
France	677	2,59
Grèce	251	0,48
Guatemala	162	0,37
Haïti	65 [b]	0,25
Honduras	137	0,40
Islande	588	3,30
Inde	57 [c]	0,35
Irlande	384	1,81
Italie	277	0,98
Japon	165	1,07
Mexique	223	0,88
Nouvelle-Zélande	921 [a]	2,96
Norvège	714	5,10
Panama	342	0,52
Paraguay	130	0,28
Pays-Bas	447	2,14
Pérou	118	0,57
Philippines	143	0,36
Porto Rico	427	1,24
Portugal	184	0,56
République Dominicaine	152	0,51
Royaume-Uni	715	4,58
Suède	914	4,37
Suisse	972	2,57
Turquie	168	0,52
Venezuela	518	1,45

[a] 1952-1953.
[b] République fédérale allemande et Berlin-Ouest.
[c] 1951-1952.

Sources : Sauf pour le Brésil et le Chili, les chiffres du revenu national ont été fournis par W. R. Leonard, Directeur du Bureau de statistique des Nations Unies, et ajustés d'après les chiffres de population parus dans l'*Annuaire statistique* des Nations Unies. Pour le Brésil et le Chili, les chiffres ont été établis séparément en se basant sur les données statistiques des Nations Unies et sur les taux de change officiels, ainsi que sur la publication du Bureau de statistique des Nations Unies, Séries E-1, *National and per Capita Incomes, Seventy Countries,* 1949.

Les chiffres relatifs à la consommation d'énergie représentent la somme de deux facteurs : le chiffre de l'énergie commerciale emprunté à l'Annuaire statistique des Nations Unies et le chiffre de l'énergie non commerciale évalué d'après les données publiées en 1949 par les Nations Unies, Études statistiques Série J-1, *Ressources mondiales en énergie au cours de certaines années de la période 1929 à 1950.*

Tableau C

Indices de la consommation d'énergie par unité de produit national net dans divers pays

Année	Argentine	Brésil	Chili	Mexique	États-Unis
1952	121,1	100,2	93,5	110,1	97,4
1951	109,0	99,7	101,5	106,1	102,1
1950	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1949	95,1	109,5	105,0	106,6	96,2
1948	88,2	119,1	103,6	104,7	105,5
1947	83,4	116,8	104,7	102,3	111,1
1946	89,0	115,0	96,5	96,6	99,1
1945	99,9	142,5	90,8	96,0	91,5
1944	110,4	142,2	107,1	94,1	91,1
1943	112,4	141,4	111,8	102,3	91,1
1942	105,3	143,8	109,2	94,4	97,4
1941	102,3	147,4	105,6	97,1	102,1
1940	99,2	157,8	106,5	106,7	108,9
1939	100,9	162,2	98,8	104,1	107,2
1938	99,0	—	110,6	—	107,2
1937	93,2	—	95,3	—	117,9
1936	101,3	—	98,5	—	116,2
1935	105,8	—	106,8	—	116,6
1934	105,5	—	107,1	—	120,4
1933	120,2	—	112,1	—	125,1
1932	105,3	—	119,5	—	115,7
1931	105,7	—	115,4	—	114,9
1930	116,1	—	96,7	—	123,8
1929	100,0	—	83,4	—	126,0
1928	99,7	—	82,5	—	124,7
1927	104,2	—	93,2	—	128,1
1926	102,3	—	89,9	—	131,5
1925	94,3	—	92,0	—	126,4

Sources : Pour l'Argentine, le Brésil, le Chili et le Mexique, les indices ont été établis d'après l'étude de Adolpho Dorfman, *The Development of Electricity Production and Consumption as Related to the Process of Industrialization in the Latin American Countries,* Conférence mondiale de l'énergie, Rio de Janeiro, juillet 1954.

Les indices des États-Unis sont établis sur la base du rapport existant entre les quantités de combustibles minéraux bruts et d'énergie hydraulique consommés (exprimées en équivalents de Btu) et le produit national brut exprimé en prix constants.

Tableau D

Prix du transport du charbon entre Cardiff (Angleterre) et certains ports, exprimés en pourcentages du prix du charbon à Cardiff, au cours de certaines années de 1871 à 1933

Ville	Distance de Cardiff (en milles marins)	Prix du transport exprimé en pourcentage du prix du charbon à Cardiff					Rapport entre les pourcentages des prix des transports de diverses années			
		1871	1902	1904	1924	1933	1902 / 1871	1933 / 1871	1933 / 1904	1933 / 1924
Le Havre	377	83,07	34,18	35,29	13,81	23,11	41,15	27,82	65,49	167,32
Dieppe	412	83,07	35,55	35,29	13,56	22,33	42,79	26,88	50,87	164,70
Rouen	433	99,69	42,38		14,83	26,75	42,52	26,83	63,82	180,40
Bordeaux	540	91,38	32,81	41,91			35,22			
Anvers	558	109,03	36,92	37,50	14,57	26,10	33,86	23,94	69,60	179,15
Bilbao	560	85,67	30,46	32,35	26,23	44,15	35,56	51,54	136,46	168,29
Hambourg	821	101,25	34,18	—	—	—	33,76	—	—	—
Lisbonne	873	103,84	36,92	39,71	26,23	41,16	35,55	39,64	103,67	156,90
Copenhague	1 116	—	—	39,71	29,59	25,84	—	—	65,08	87,33
Gibraltar	1 153	114,23	42,38	44,85	24,33	85,97	37,10	31,49	80,19	147,82
Madère	1 319	—	—	52,21	28,39	42,88	—	—	82,14	151,05
Stockholm	1 498	101,25	41,02	—	—	—	40,51	—	—	—
Barcelone	1 664	205,09	55,37	—	—	—	27,00	—	—	—
Cronstadt	1 776	98,65	41,02	—	—	—	41,58	—	—	—
Marseille	1 844	137,08	43,58	—	—	—	31,79	—	—	—
Gènes	2 007	179,13	44,44	51,10	30,16	34,93	24,81	19,50	68,35	115,81
Palerme	2 065	—	—	50,00	33,20	44,15	—	—	88,30	132,97
Naples	2 132	—	—	48,53	32,95	36,62	—	—	75,46	127,53
Malte	2 133	150,57	35,55	—	—	—	23,61	—	—	—
Cap de Verdes	2 408	155,76	58,11	—	—	—	37,31	—	—	—
Le Pirée	2 642	179,13	41,70	45,59	32,26	39,61	23,38	22,11	86,88	122,77
Trieste	2 806	192,11	45,80	—	—		23,84			
Venise	2 825	202,49	51,96	56,62	36,88	43,63	25,66	21,55	77,06	118,31
Sierra Leone	2 885	197,30	69,73				35,35			
Constantinople	2 952			46,32	36,50	45,19			97,55	123,81
Alexandrie	2 943	192,11	47,75	48,90	35,63	38,18	24,86	19,87	78,08	107,16
Port-Saïd	3 082	202,49	43,75	46,69	33,96	36,88	21,61	18,31	78,98	108,58
Odessa	3 272	166,15	69,73				41,97			
Saint-Thomas	3 525	181,72	65,63				36,11			
La Havane	4 025	207,68	69,73				33,57			
La Jamaïque	4 034	176,53	61,53				34,85			
Rio de Janeiro	5 027	259,61	92,29	78,31	38,88	51,81	35,55	19,96	66,16	133,27
Capetown	5 998	223,26	128,52				57,57			
Montevideo	6 139	311,53	84,43	63,97	38,67	54,54	27,10	17,51	85,26	141,04
Buenos Aires	6 129	394,60	90,24	63,24	39,04	58,69	22,87	14,87	92,82	150,04
Bombay	6 154	269,99	82,03				30,38			
Singapour	11 574 8 132	267,39	98,44				36,82			
Valparaiso	8 869 7 588	311,53	98,44				31,60			
Iquique	9 623 6 830	379,02	85,45				22,55			
Aden	9 865 4 426	285,56	80,67	69,12	42,33	56,10	28,25	19,64	81,12	132,53
Colombo	10 330 6 515	249,22	86,14	72,79	42,71	57,65	34,56	23,13	79,20	134,50
Changhaï	10 466	446,52	136,04				30,47			
Yokohama	11 094	425,75	137,41				32,27			

Sources : 1871 et 1902 : « The Growth and Direction of our Foreign Trade in Coal during the Last Half Century », par D. A. Thomas, paru dans le numéro de septembre 1903 du *Journal of the Royal Statistical Society*. Les frais sont indiqués à l'annexe B, pages 67 à 69. Pour les années 1871 et 1902, le prix du charbon est celui indiqué à la page 47. Ces prix étaient de 9,63 shillings et 10,53 shillings respectivement, valeur déclarée au charbon britannique exporté. L'annexe B ne donne pas le prix du frêt pour 1871; aussi avons-nous utilisé à la place le frêt payé en 1872. L'année 1871 a été choisie parce qu'elle semble donner une idée plus exacte de la période antérieure que les années 1872 ou 1873, cette dernière année étant considérée par Thomas (page 46) comme une année de prix particulièrement élevés.

Voir fin de la note à la page 77.

Tableau E

Investissements nécessaires pour consommer l'énergie produite par une centrale d'une puissance de 70000 kW (produisant approximativement 250 millions de kWh par an, pour un coefficient d'utilisation de 40 pour cent)

(Sauf indication contraire, les chiffres représentent des millions de dollars de 1947)

Groupes d'industries (avec leur numéro de recensement)	1947 Consommation d'énergie électrique (10⁹ kWh) (1)	1947 Valeur ajoutée par la transformation (2)	Valeur ajoutée par kWh d'énergie consommée (dollars) (3)	Valeur ajoutée en consommant 250 millions de kWh (4)	Investissements de capitaux nécessaires pour 1 dollar de valeur ajoutée (non compris le terrain) (5)	Total des investissements nécessaires (aménagement et équipement) pour consommer 250 millions de kWh par an (6)
21. Industries du tabac . . .	219	641	2 927	732	424	310
22. Filatures	10 041	5 341	532	133	674	90
23. Confection et articles similaires	850	4 443	5 227	1 307	287	375
24. Industrie du bois et produits similaires, à l'exception du mobilier	2 338	2 497	1 068	267	1 130	302
25. Fabriques de meubles et d'accessoires mobiliers .	826	1 378	1 668	417	687	286
29. Industries du pétrole et du charbon	6 498	2 015	310	78	3 467	270
32. Industries de la pierre, céramique et verrerie	7 898	2 306	292	73	1 520	111
33. Usines métallurgiques . .	40 645	5 765	142	36	3 080	111
34. Industries de transformation des métaux	3 901	1 921	1 261	315	1 110	350

Sources : (1), (2) : 1947 Census of Manufactures; (3) : Rapport entre (2) et (1); (4) : (3) × 250 millions de kWh; (5) : D'après R. Grosse, *Capital Requirements for the Expansion of Industrial Capacity*, Bureau of the Budget, Office of Statistical Standards, 30 novembre 1953. Pour arriver à ces chiffres, on a combiné les coefficients relatifs aux investissements nécessaires dans les différentes industries, de chacun des groupes d'industries constitués en vue du recensement; cette pondération a été faite en prenant pour base l'expérience de l'année 1947. Il y a lieu de signaler toutefois que les coefficients d'investissement sur lesquels nous nous sommes basés avaient été calculés dans des buts précis et limités et n'ont pas de valeur générale; il en résulte que la méthode de calcul adoptée est assez rudimentaire et que les chiffres obtenus n'ont qu'un caractère assez approximatif; ils ne peuvent servir qu'à évaluer, *grosso modo*, l'ordre de grandeur des quantités requises; (6) Produit de (4) par (5).

Fin de la note au tableau D :

Pour chacune des années 1904, 1924 et 1933, le prix du transport et celui du charbon ont été pris dans le *South Wales Coal Annual*, de 1914, 1924 et 1934. Pour les années en question, on a estimé que les prix atteignaient 85 pour cent des prix du gros charbon sec criblé à la mine tel qu'ils sont donnés dans les tableaux publiés dans chacun des numéros du *Annual*. Les prix utilisés pour le charbon sont les suivants : 1871 : 9,63 shillings; 1902 : 10,53 shillings; 1904 : 11,33 shillings; 1924 : 23,23 shillings; 1933 : 16,04 shillings; certains des prix publiés par Thomas sont libellés en francs. Ces prix ont été convertis en livres sterling au cours de 25 francs pour une livre.

Les données statistiques manquent pour les autres années.

Tableau F

Moyennes établies par périodes de cinq ans des prix relatifs des combustibles minéraux[a] et de l'énergie électrique aux États-Unis de 1900 à 1954

Période	Ensemble de combustibles minéraux [b]	Bitumineux et lignite	Anthracite	Pétrole brut	Gaz naturel	Énergie électrique
1950-54 . .	112,1	125,9	111,7 [c]	113,1	72,9	36,7
1945-49 . .	108,5	130,5	107,5	102,1	64,7	46,6
1940-44 . .	96,4	113,6	102,1	92,1	81,4	69,4
1935-39 . .	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1930-34 . .	94,7	93,2	129,6	89,4	141,2	132,5
1925-29 . .	94,9	88,3	111,7	109,2	141,0	96,5
1920-24 . .	107,4	119,7	96,8	123,3	159,1 [d]	92,7
1915-19 . .	66,1	78,9	56,1	97,4	—	88,2 [e]
1910-14 . .	60,8	74,6	61,3	81,3	—	152,6 [f]
1905-09 . .	60,7	77,3	60,5	82,4	—	184,4 [g]
1900-04 . .	86,1	85,3	63,6	123,5	—	236,0 [h]

[a] Prix à la mine ou au puits divisés par l'indice des prix de gros et exprimés sous forme d'indices sur la base de 1935-1939 = 100.
[b] Prix à la mine ou au puits par millions de Btu de tous les combustibles minéraux consommés aux États-Unis.
[c] 1950-1953 seulement. [e] 1917 seulement. [g] 1907 seulement.
[d] 1922-1924 seulement. [f] 1912 seulement. [h] 1902 seulement.

Source : U. S. Bureau of Mines.

Tableau G

Moyennes établies par périodes de cinq ans de la consommation des combustibles minéraux et de la production totale d'énergie électrique aux États-Unis de 1900 à 1953

Période	Consommation nationale apparente de combustibles minéraux [a] (10^{12} Btu)	Production d'énergie électrique [b] (10^{9} kWh)
1950-53	34 792	449 814
1945-49	30 569	306 028
1940-44	27 139	233 685
1935-39	20 422	140 936
1930-34	17 784	107 285
1925-29	22 095	101 019
1920-24	19 189	63 636
1915-19	17 890	43 429 [c]
1910-14	15 134	24 752 [d]
1905-09	12 320	14 121 [e]
1900-04	8 746	5 969 [f]

[a] La « consommation apparente » correspond au total de la production nationale et des importations après déduction des exportations. Il n'est pas tenu compte des changements dans les stocks.
[b] Total de l'énergie produite par les centrales publiques et industrielles, sans tenir compte des centrales dont la capacité est inférieure à 100 kW.
[c] 1917 seulement.
[d] 1912 seulement.
[e] 1907 seulement.
[f] 1902 seulement.

Sources : Bureau of Mines et Federal Power Commission.

Tableau H

Prix moyen payé pour le combustible par les centrales électriques, et revenu national par personne dans chacun des états, 1952

État	Prix moyen pour 1 million de Btu		Prix moyen	
	Numéro d'ordre	En cents des E.-U.	Numéro d'ordre	En dollars des E.-U.
Vermont	1	57,00	30	1 362
Maine	2	37,57	31	1 358
Connecticut	3	37,20	3	2 071
Massachusetts	4	36,31	11	1 772
New Hampshire	5	36,17	25	1 555
Rhode Island	6	36,08	18	1 661
District de Columbia	7	35,00	2	2 135

Tableau H (*Fin*)

Prix moyen payé pour le combustible par les centrales électriques, et revenu national par personne dans chacun des états, 1952

État	Prix moyen pour 1 million de Btu		Prix moyen	
	Numéro d'ordre	En cents des E.-U.	Numéro d'ordre	En dollars des E.-U.
New York	8	33,67	4	2 062
Dakota méridional	9	33,62	39	1 229
New Jersey	10	33,26	7	1 975
Washington	11	32,60	10	1 810
Oregon	12	32,40	14	1 712
Wisconsin	13	32,10	16	1 676
Maryland	14	32,02	12	1 754
Caroline du Nord	15	31,70	44	1 058
Delaware	16	31,59	1	2 207
Caroline du Sud	17	31,57	43	1 088
Floride	18	31,09	33	1 335
Michigan	19	30,72	9	1 830
Minnesota	20	30,24	27	1 502
Virginie	21	28,64	32	1 338
Dakota septentrional	22	27,80	36	1 244
Iowa	23	27,07	24	1 573
Utah	24	26,25	28	1 459
Nebraska	25	25,57	23	1 584
Pennsylvanie	26	24,58	13	1 734
Indiana	27	24,11	17	1 668
Californie	28	23,79	6	1 978
Illinois	29	23,52	5	1 988
Géorgie	30	23,26	40	1 139
Ohio	31	22,91	8	1 872
Missouri	32	21,23	22	1 610
Tennessee	33	20,60	41	1 127
Kentucky	34	20,43	42	1 125
Montana	35	19,08	15	1 690
Virginie occidentale	36	18,36	37	1 233
Alabama	37	18,16	45	999
Kansas	38	17,90	21	1 629
Arizona	39	17,71	26	1 503
Nouveau Mexique	40	17,65	34	1 331
Colorado	41	17,46	20	1 630
Wyoming	42	17,03	19	1 657
Arkansas	43	13,85	46	967
Mississippi	44	12,52	47	826
Oklahoma	45	9,38	35	1 293
Louisiane	46	9,21	38	1 230
Texas	47	9,07	29	1 457

Sources : Steam-Electric Plant Fuel Consumption and Cost, 1952, National Coal, Association, *Survey of Current Business*, août 1954.

Sources d'énergie non classiques

par Freddy Ba Hli *

Au cours des dernières années, savants et ingénieurs ont considéré avec inquiétude l'état des ressources en énergie du monde, en particulier la diminution des réserves du sol en combustibles classiques. Cette inquiétude s'explique par la constatation que, depuis que l'homme a pour la première fois tiré parti du charbon, en 1800, et du pétrole, en 1857, la consommation annuelle de ces combustibles de formation fossile a doublé tous les dix-sept ans, pour atteindre aujourd'hui le volume énorme de 15×10^{15} kcal, correspondant à 5×10^{12} kWh par an [1] **. Quand on pense qu'il a fallu des millions et des millions d'années pour que ce charbon et ce pétrole se forment au sein de la terre, on peut se demander avec appréhension ce que l'on fera le jour où les réserves actuelles de charbon et de pétrole seront épuisées.

Le monde peut néanmoins continuer, pendant de nombreux siècles encore, à doubler sa consommation d'énergie tous les vingt ans, car nous savons maintenant qu'en nous adressant aux sources non classiques, nous pourrons obtenir d'énormes quantités d'énergie sans limitations prévisibles.

Quelles sont ces sources d'énergie non classiques ?

Du point de vue scientifique, il semble peut-être nécessaire de définir l'expression « source d'énergie non classique ». Je pense que tout homme a une vague notion de ce qu'est un combustible classique, et de ce qui n'en est pas un : presque tous, nous nous sommes arrêtés à une pompe à essence pour acheter quelques litres de carburant, et nous considérons cela comme une action des plus banales. C'est pourquoi la plupart des gens s'accorderont à appeler l'essence un combustible classique. Cela est vrai également de l'huile minérale et des autres dérivés du pétrole ou du charbon. En revanche, bien rares sont ceux qui ont eu jusqu'à présent l'occasion de demander quelques grammes d'uranium-235 pour faire marcher leur voiture. Ainsi, en l'état actuel des choses, l'uranium-235 est un combustible non classique, encore qu'il soit impossible d'affirmer qu'il ne sera pas devenu un combustible classique d'ici un siècle. Après tout, qui, en 1855, aurait pu s'arrêter devant une pompe à essence? Et même si par miracle il avait existé de ces pompes, qui s'y serait rendu puisque les chevaux n'ont nul besoin de ce genre de nourriture? Nous n'essaierons donc pas de définir avec précision l'expression « source d'énergie non classique »; nous dirons tout simplement qu'elle peut s'appliquer à tout ce qui n'est ni charbon, ni pétrole, ni énergie hydraulique.

Selon ce critère, les piles nucléaires constituent à n'en pas douter une de ces sources non classiques. Mais je ne traiterai pas de l'énergie atomique, puisque la Conférence consacrera principalement le reste de ses travaux à l'examen détaillé de cette question. Je parlerai donc aujourd'hui des autres sources d'énergie non classiques.

C'est l'énergie solaire qui me vient en premier à l'esprit. Assurément, nous ne considérons pas habituellement le soleil comme une source normale d'énergie; et pourtant, dans tout ce que l'homme a entrepris au cours des siècles, c'est en dernière analyse le soleil qui a été la source d'énergie; car le charbon et le pétrole ne sont rien d'autre que des réserves de lumière solaire; les aliments même dont les hommes se sont nourris, ou les fourrages qu'ont mangés les bêtes de trait n'auraient pas pu être produits sans l'aide de la lumière solaire. Le vent qui poussait les voiliers et faisait tourner les moulins, était dû aux différences d'insolation de la terre, et les chutes d'eau entraînant les roues et les turbines devaient leur puissance à l'évaporation de l'eau sous l'action du soleil.

Outre l'énergie solaire et ses manifestations indirectes, l'homme a utilisé, à un certain degré, l'énergie dégagée par des réactions chimiques. Depuis les découvertes de Volta, il a tiré parti des piles primaires dans lesquelles des forces électrochimiques produisent du courant qu'il peut transformer en travail. Encore qu'elle ne soutienne pas la comparaison avec l'énergie tirée des sources classiques, l'énergie électrique ainsi produite dans le monde entier à notre époque est égale à ce qui était consommé au total en électricité pendant les premières années du siècle. Si nous y ajoutons les piles secondaires, ce chiffre doublera, car ces dernières fournissent plusieurs millions de kWh d'énergie utilisés à des fins diverses.

L'utilisation nouvelle donnée à l'alcool éthylique dilué en vue d'obtenir la force motrice des fusées a révélé une nouvelle source d'énergie d'origine chimique. Je dis bien l'utilisation nouvelle de

Original : anglais.

* Directeur par intérim du Centre de l'énergie atomique de l'Union birmane, Kanbe, Rangoon.

** Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie qui figure à la fin du mémoire.

l'alcool éthylique dilué, car nous savons tous que cet alcool, sous de nombreuses appellations telles que « whisky » et « vodka », est une puissante source de chaleur et d'énergie motrice pour les êtres humains.

Enfin, emboîtant le pas à H. G. Wells, nous pouvons considérer la lune comme une source d'énergie et utiliser les marées pour faire fonctionner des centrales hydrauliques. Toutes ces utilisations, et d'autres encore, seront examinées en détail ci-après.

L'ÉNERGIE SOLAIRE

Dans les limites du système solaire, le soleil est le père, et tel un bon père, il n'a cessé au cours des siècles de donner la vie en prodiguant de l'énergie à la terre sur laquelle nous vivons. On aura une idée de cette quantité d'énergie si l'on se rend compte qu'en quelques semaines le soleil déverse sur la terre l'équivalent de l'énergie emmagasinée dans tous les gisements souterrains de charbon, et qu'en une année il rayonne l'équivalent thermique de 4×10^{23} tonnes d'anthracite. La terre, qui se trouve à une distance moyenne de 93 millions de miles (150 millions de kilomètres) du soleil, capte moins de un deux-millième de millionième de l'énergie solaire, mais ainsi que nous l'avons indiqué plus haut, cette fraction infime est encore extrêmement importante.

L'origine de cette énorme production d'énergie a été pendant longtemps un sujet de discussion entre les savants, et d'après les premières théories, la fin du monde, qui devait lentement mourir de froid, surviendrait en un temps relativement bref (il s'agit bien entendu de temps géologique!) Certains même, qui ne saisissaient pas la longueur infinie des périodes géologiques, s'effrayaient vivement devant cette perspective. Mais tout cela appartient au passé. Nous pensons maintenant que la chaleur du soleil est due en réalité à la fusion de noyaux et que, comparé à tous nos étalons habituels, le soleil constitue une source inépuisable d'énergie.

Ainsi que le Dr Bhabha l'a déclaré dans son discours d'ouverture à la Conférence indienne de l'énergie atomique, dès que l'homme disposera d'un moyen pratique pour commander la fusion nucléaire, il pourra cesser de se préoccuper des besoins futurs du monde en énergie, car il en aura plus à sa portée qu'il ne saurait en utiliser.

On évalue à 10^{14} kW le flux de chaleur solaire qui traverse l'atmosphère terrestre. Cela signifie que pour un pays situé sous les tropiques et ayant la superficie de la Birmanie, la puissance transportée par la lumière solaire qui l'éclaire atteint le volume terrifiant de 240 000 millions de kilowatts. Que peut-on faire de cette gigantesque puissance? Étudions rapidement le parti que l'homme tire de l'énergie solaire.

Photosynthèse

Depuis l'origine des temps, l'homme utilise les plantes pour sa nourriture et pour celle des bêtes de trait. Le rendement de l'utilisation de la lumière solaire par les plantes est en moyenne de 0,25 pour cent, en sorte que la somme du travail humain et animal résultant de cette utilisation indirecte de la lumière solaire est très faible. L'homme utilise également le bois pour la cuisine et le chauffage (à des fins ménagères et industrielles). Or, le bois est également un produit de la photosynthèse opérée par le soleil, et le rendement de cette utilisation est d'environ 1 pour cent dans des conditions favorables. D'après les observations effectuées dans les régions tropicales, une acre (environ 40 ares) de terrain produit chaque année de 5 à 10 tonnes de bois sec pouvant contenir jusqu'à 40 pour cent de carbone [2]. Ces chiffres varient selon les essences et les ressources en eau. Toutefois, le bois n'est pas un combustible aussi agréable que le charbon ou le pétrole, et il ne dégage en brûlant qu'une quantité de chaleur de 2 kcal par gramme [3], tandis que le charbon en produit 8 et le pétrole 10, voire davantage.

De nombreux rapports, faisant état des résultats de recherches tendant à améliorer les méthodes de photosynthèse, ont été consacrés récemment à l'utilisation d'algues, notamment de la chlorelle, qui permettent, dans des conditions données, de fixer le carbone de l'air sous l'action de la lumière solaire. Certains des rendements cités pour la chlorelle devraient être considérés avec prudence, car dans bon nombre d'expériences, on avait à dessein enrichi en gaz carbonique l'atmosphère entourant les plantes, et recouru à de coûteuses méthodes de culture pour obtenir un rendement élevé. Il va de soi qu'il faudrait tenir compte du coût supplémentaire de ces artifices dans une estimation économique. Dans l'ensemble, il semble que la culture de la chlorelle constitue un bon moyen de fixer le carbone là où seules l'eau et la lumière solaire sont abondantes, à condition d'utiliser un procédé peu coûteux pour dessécher cette algue; sinon, il vaut bien mieux recommander la plantation normale d'arbres donnant du bois de chauffage, ou la culture de betteraves ou de cannes à sucre qui peuvent être transformées en alcool combustible destiné aux moteurs à combustion interne. Dans de nombreuses régions du monde, les déchets de la production agricole (par exemple les feuilles et les tiges des plantes dont on récolte les fruits, les tubercules ou les graines) constituent une importante source de chaleur et d'énergie, et comptent en fait pour plus d'un dixième dans la consommation mondiale d'énergie [4]. Ainsi, grâce à la photosynthèse, l'homme a utilisé et continue d'utiliser l'énergie solaire comme source de chaleur et d'énergie.

Moteurs solaires

On peut également tirer parti de l'énergie solaire en essayant de construire des moteurs actionnés directement par la chaleur du soleil. Ou encore, on

peut employer la chaleur solaire pour la cuisine. Dans ces questions, la difficulté de réalisation provient de ce que l'intensité normale de la chaleur solaire est trop faible pour amener l'eau à l'ébullition. Nous ne pouvons d'ailleurs que nous en féliciter, car autrement nous en mourrions tous, à moins de vivre perpétuellement à l'ombre. Mais, pour ce qui est du fonctionnement des machines à vapeur et de la cuisson des aliments, c'est un inconvénient. Quand on pense que si nous parvenions à capter la lumière solaire tombant sur un mille carré (environ 2,590 km²) de terres tropicales, nous pourrions obtenir jusqu'à un millions de kW [5], il nous semble que c'est un gaspillage particulièrement regrettable que de ne pas utiliser la chaleur du soleil. C'est là une puissance extraordinaire, mais qui ne peut être obtenue qu'à une température peu élevée, et, selon les lois de la thermodynamique, le rendement de l'utilisation de cette chaleur est insuffisant si l'on ne trouve un moyen d'en élever la température. De nombreux savants se sont certes penchés sur ce problème, auquel diverses solutions ont été proposées, mais elles sont inefficaces et onéreuses. Toutefois les recherches se poursuivent; ainsi, M. Vannevar Bush, qui faisait autrefois partie du Massachusetts Institute of Technology et travaille maintenant à l'Institut Carnegie, a proposé de réaliser un moteur à air chaud qui servirait à pomper l'eau et tirerait sa puissance de la chaleur solaire.

Photoélectricité et piles solaires

Les appareils de transformation de l'énergie solaire mis au point récemment par les Bell Telephone Laboratories [6] donnent des résultats encourageants, car ils produisent de l'électricité avec un rendement de 5 pour cent. Comme ce procédé n'a pas dépassé le stade expérimental, on ne peut indiquer de prix pour ces appareils, mais s'il était possible de les fabriquer à des prix raisonnables, une forte demande se manifesterait. L'appareil, dont l'existence a été annoncée l'année dernière et qui est bien connu sous le nom de batterie solaire, utilise de minces couches de silicium. Le Wright Air Development Center [7] utilise des cristaux de sulfure de cadmium dans le même dessein.

Le fonctionnement de ces appareils repose sur les propriétés de ces corps très curieux, récemment découverts, que l'on nomme semi-conducteurs, et qui ont déjà déclenché une vraie révolution dans le domaine de l'électronique et des télécommunications. En quelques mots, le phénomène se produit au moment où la lumière frappe la surface d'un semi-conducteur; les photons lumineux libèrent à l'intérieur du semi-conducteur des électrons qui se dirigent vers les électrodes et qui engendrent dans le circuit extérieur un courant apte à accomplir un travail utile.

Fours et cuisinières solaires

Un moyen facile de tirer parti de l'énergie solaire consiste à l'employer pour le chauffage, puisque l'énergie solaire se manifeste déjà sous forme de chaleur rayonnante; le seul problème qui se pose est de savoir comment concentrer une chaleur d'environ $^1/_2$ kW par m² (intensité normale de la lumière solaire) jusqu'à plus de 6 kW par m², ce qui est indispensable pour faire bouillir de l'eau et cuire des aliments dans les conditions normales des régions tropicales.

Des documents anciens indiquent que diverses tentatives ont été faites en vue de faire cuire les aliments au moyen de la chaleur solaire. Il semble que de Saussure [8], en 1776, ait été le premier à utiliser un four solaire, c'est-à-dire une boîte isolée, noircie à l'intérieur et perçée de fenêtres à double vitrage qui laissent pénétrer la lumière solaire, mais empêchent les radiations infra-rouges émises à l'intérieur de la boîte de sortir. On peut aussi concentrer les rayons solaires au moyen de lentilles ou de miroirs. Si les rayons pouvaient être concentrés de façon idéale, il serait théoriquement possible d'atteindre une température de 6 000 °C, la température du soleil lui-même.

Lavoisier s'est servi d'une lentille creuse remplie d'alcool pour concentrer les rayons du soleil, et il a obtenu une température de 1 773 °C; plus récemment, son compatriote Trombe a atteint une température de 3 000 °C en utilisant des miroirs paraboliques.

Pour la cuisson normale, la préférence va nettement à des appareils à réflecteur métallique, dont le prix de revient est peu élevé. MM. K. N. Mathur et M. L. Khanna, du Laboratoire national de physique de l'Inde, ont réalisé une cuisinière solaire pour le prix modique de 79 roupies (16 dollars des États-Unis d'Amérique ou 6 livres sterling), qui comprend un miroir parabolique en aluminium de 9,6 pieds carrés (environ 0,9 m²). C'est un ustensile peu encombrant et pratique qui donne satisfaction sous le climat extrêmement chaud et aride de la Nouvelle-Delhi. Toutefois, les villageois ont peine à le fabriquer, et le prix de revient en est encore un peu trop élevé pour eux. C'est pourquoi Gardner [9], de l'UNESCO, a mis au point des cuisinières domestiques « semi-articulées » comprenant des rangées superposées de petits miroirs plans en verre que l'on peut orienter vers le récipient à chauffer. Le coût d'un de ces appareils, comprenant un mètre carré de surface réfléchissante, est évalué à 20 roupies (4 dollars des États-Unis d'Amérique).

Les cuisinières solaires les moins coûteuses actuellement à la portée des populations rurales ont été mises au point par l'Institut de recherches appliquées de l'Union birmane, à Rangoon. Elles fonctionnent au moyen de miroirs paraboliques verticaux de 4 pieds de hauteur sur 1 pied de largeur (environ 1,20 m sur 0,30 m) épousant la courbe d'une parabole horizontale tracée sur le sol. Elles peuvent être fabriquées par les villageois à l'aide de matériaux qu'ils n'ont pas de difficulté à se procurer et peuvent servir à la cuisson de toute espèce d'aliments. En les imaginant, l'auteur de la présente

communication a cherché à réaliser des appareils dont la fabrication simple et peu coûteuse permettrait aux populations de la zone aride de Birmanie de se passer de bois à brûler dont l'utilisation entraînait le déboisement de presque toute cette région. Les besoins de chaleur pour la cuisine s'élevant à environ 100 000 millions de kWh par an pour la fraction de la population mondiale vivant sous les tropiques, l'emploi de la chaleur solaire pour la cuisson des aliments permettrait de faire face dans une large mesure à ces besoins en énergie thermique, spécialement dans les régions desséchées et chaudes où brille un soleil maléfique et implacable qui a détruit toute végétation. Dans ces mêmes régions, l'utilisation de la chaleur solaire dans des pompes thermiques pour assurer le refroidissement de l'air dans des installations de climatisation ouvre d'autre part des perspectives fort intéressantes.

Chauffage domestique au moyen de l'énergie solaire

Dans les régions froides, on peut utiliser les rayons solaires avec un très bon rendement, pour chauffer les maisons pendant l'hiver.

Pendant qu'elle était au Massachusetts Institute of Technology, M^me^ M. Telkes a établi les plans d'une installation de chauffage solaire pour une maison de Cambridge, et pour une autre construite à Dover (Massachusetts). La maison de Dover est chauffée grâce à un système dans lequel la chaleur d'origine chimique que dégage le sulfate de sodium sous l'effet de la lumière solaire sert à maintenir une température de 32 °C (90 °F). La chaleur peut être emmagasinée pendant dix jours en prévision des périodes sans soleil.

Photochimie

Le rapport de Heidt [3], publié par le Massachusetts Institute of Technology, signale une autre utilisation possible de l'énergie solaire, à savoir la photoanalyse de l'eau en hydrogène et en oxygène sous l'action des rayons ultraviolets en présence de sels de cérium. Les deux gaz pourraient être ensuite recombinés en dégageant de la chaleur sous une température élevée. Les radiations ultraviolettes sont rares dans le spectre solaire qui nous parvient, ce qui est heureux car si tous les rayons ultraviolets du soleil devaient atteindre notre planète, nous ne serions pas ici aujourd'hui. Le procédé chimique ci-dessus n'est donc pas réalisable, mais la découverte de quelque autre catalyseur utilisant les longueurs d'ondes visibles pour provoquer les mêmes réactions, ou des réactions analogues, permettrait dans l'avenir une nouvelle utilisation de l'énergie solaire.

Évaporation solaire

Avant d'abandonner le problème de l'utilisation de l'énergie solaire, évoquons un projet [10] qui n'est toujours qu'un rêve d'ingénieur mais dont la réalisation serait cependant tout à fait possible du point de vue technique. Ce projet consisterait à tirer parti de la capacité qu'a le soleil de faire évaporer d'abondantes quantités d'eau de cette région brûlante de l'Arabie, où le ciel est sans nuages, et plus particulièrement de la mer Rouge. Bigarre a calculé que si l'afflux des eaux de l'océan Indien dans la mer Rouge était arrêté par la construction d'un barrage qui couperait le détroit resserré de Bab el-Mandeb, l'évaporation rapide absorberait 153 200 pieds cubes (environ 5 700 m^3) d'eau par jour et abaisserait chaque année le niveau de la mer Rouge de 12 pieds (environ 3,65 m) par rapport à celui de l'océan Indien. Au bout de quelques années, il serait possible grâce à un tel barrage de produire de l'énergie à raison de 240 millions de kWh par jour. Comme je l'ai dit, ce n'est encore là qu'un rêve d'ingénieur. La principale raison pour laquelle il n'a pas été réalisé est qu'actuellement personne dans cette région n'a besoin d'une aussi énorme quantité d'énergie. Dans plusieurs régions du monde, notamment en Afrique, il serait peut-être possible du point de vue technique de réaliser des projets de ce genre, qui mettraient au service de l'homme la capacité d'évaporation du soleil (qui n'a servi, jusqu'à présent, qu'à faire sécher le linge) et permettraient probablement à eux seuls de produire chaque année 10^{11} kWh d'énergie électrique.

LE VENT, SOURCE D'ÉNERGIE

A une époque très reculée, l'homme a appris à se servir du vent pour pousser ses voiliers, et plus tard pour faire tourner ses moulins à blé, etc. Dans l'utilisation la plus récente du vent, celui-ci entraîne des génératrices électriques reliées à des hélices.

Le vent est une source d'énergie assez puissante qui, si elle était pleinement exploitée, pourrait produire de relativement grandes quantités d'énergie. Ainsi, avec des hélices modernes d'un profil aérodynamique, le vent soufflant sur un front de 1 mille carré de surface (environ 2,59 km^2) pourrait produire 150 000 kW chaque fois que sa vitesse dépasse 4 à 5 milles à l'heure (la vitesse d'une simple brise), soit environ 6 à 8 km/h.

Tant qu'il n'est pas possible de distribuer l'électricité dans les régions rurales au moyen de lignes de transmission, une éolienne constitue une source d'énergie électrique très satisfaisante et très commode. Les éoliennes installées sur toute l'étendue de la Prairie, sur le continent américain en sont des témoins silencieux. Mais tant à cause des frais qu'entraîne l'accumulation de l'électricité dans des batteries, que de leur faible rendement, ces génératrices ne peuvent soutenir la concurrence de l'énergie électrique à bon marché distribuée par les lignes de transmission, dont le kilowatt ne coûte que quelques cents. Et ces mêmes éoliennes inutilisées témoignent, silencieusement aussi, de la véracité de cette dernière assertion.

Toutefois, les génératrices éoliennes ont une place tout indiquée dans certaines régions du monde où les campagnes ne sont pas encore desservies par un réseau de distribution [11]. Les moulins à vent qui pompent l'eau d'irrigation ont fait leurs preuves, et il en existe maintenant plus d'un demi-million qui chaque jour accomplissent ce travail utile à l'humanité.

L'énergie hydraulique, fournie par les chutes d'eau et les cours d'eau rapides, a des rapports très étroits avec l'énergie solaire et l'énergie éolienne; l'eau tire en effet son énergie cinétique de ces deux sources. Mais il s'agit là d'une source d'énergie classique dont l'étude sort du cadre de la présente communication. Les centrales hydrauliques installées ont une puissance de 100 millions de kW environ, et débitent 10^{12} kWh par an.

On estime que l'énergie éolienne ne pourra représenter qu'à peu près un million de kW installés, dont le débit annuel atteindra 10^{10} kWh, soit tout juste un millième des besoins du monde en énergie. Mais quel que soit l'avenir de l'énergie éolienne, il est certain que l'homme doit la découverte de bien des régions du monde au vent qui a poussé ses voiliers, qu'une grande partie des Pays-Bas doit son existence même aux moulins à vent, et que la rapidité avec laquelle s'est réalisée l'électrification rurale est due en grande partie aux génératrices éoliennes qui ont vulgarisé l'emploi de l'électricité dans les campagnes.

SOURCES CHIMIQUES D'ÉNERGIE

On fabrique chaque année des millions et des millions de piles qui, sous un faible volume, fournissent l'énergie nécessaire à des appareils portatifs. Les piles peuvent être réparties en deux catégories comprenant, l'une les éléments primaires ou piles proprement dites, et l'autre les éléments secondaires ou accumulateurs. Étant donné que les accumulateurs doivent d'abord être chargés pour pouvoir ensuite restituer de l'électricité, ils ne sont pas à proprement parler des sources d'énergie. C'est pourquoi nous traiterons principalement ici des piles primaires. Volta a fabriqué sa fameuse pile (galvanique) 150 ans avant que son compatriote Fermi ne réalisât la sienne (la pile atomique). Volta s'est servi d'argent et de zinc, avec de l'eau acidulée comme électrolyte [12]; nous connaissons tous les matériaux auxquels Fermi a fait appel.

Piles sèches

C'est en 1868 que Leclanché fabriqua les éléments de pile avec lesquels Gassner devait, en 1888, réaliser la pile sèche que chacun connaît aujourd'hui sous la forme des piles de lampe de poche, avec leurs innombrables variétés. La fabrication des appareils acoustiques, des récepteurs portatifs, des appareils météorologiques de radiosondage, du matériel portatif de communication, des détecteurs de radioactivité, pour ne citer que quelques-uns des appareils les plus récents, a provoqué une augmentation de la demande de piles sèches, de sorte que les débouchés qui s'offrent à ces sources d'énergie primaire n'ont cessé de s'élargir.

La réaction chimique génératrice d'énergie électrique est exprimée par la formule suivante :

$$Zn + 2MnO_2 = ZnO,\ Mn_2O_3$$

Le produit final, appelé hétairolite, qui est un oxyde double de manganèse et de zinc, a été identifié par une méthode de diffraction des rayons X. Au fur et à mesure que l'élément débite, le bioxyde de manganèse libère de l'oxygène, et le zinc s'oxyde.

L'année dernière, des savants et des chercheurs ont présenté des batteries primaires alimentées par l'énergie atomique. Dans l'une de ces batteries, une couche de matière radioactive est placée à côté d'une mince feuille de semi-conducteur jouant le rôle d'un transitron. Les électrons que projette la couche radioactive bombardent le semi-conducteur, ce qui donne naissance à un courant. Dans l'autre batterie atomique, du polonium sert à élever la température de l'un des côtés d'un thermocouple et engendre ainsi un courant.

Les combustibles pour fusées

Les fusées ont pris une importance de premier plan au cours de la deuxième guerre mondiale et ne cessent d'être perfectionnées à la fois à des fins militaires, et parce qu'elles peuvent constituer un véhicule interplanétaire. Dans un modèle particulier, comme la fusée V2, la source d'énergie est la violente réaction chimique que produisent l'alcool éthylique dilué et l'oxygène liquide mis en présence l'un de l'autre sous forte pression. Des pompes puissantes aspirent les deux liquides, à raison de 4 tonnes à la minute, dans une chambre de combustion où la réaction chimique engendre une pression de 215 livres par pouce carré (15 kg/cm²), à la température de 3 500 °F (environ 1 900 °C). Une minute après que les combustibles sont épuisés, la fusée, qui subit brutalement une poussée de quelque 28 tonnes, atteint finalement une vitesse de plus de 3 400 milles à l'heure (environ 5 500 km/h). Pendant l'ascension verticale, elle couvre environ 20 milles grâce à la poussée ainsi obtenue, et parcourt ensuite par inertie à peu près 80 milles dans l'air très raréfié de la stratosphère. On voit sans peine que les fusées peuvent constituer pendant quelques instants de très puissantes sources d'énergie.

Pour les vols interplanétaires, les fusées doivent atteindre des vitesses de l'ordre d'au moins 25 000 milles à l'heure (40 000 km/h) pour quitter l'atmosphère terrestre, et, avec les combustibles connus, cette vitesse ne peut être atteinte que par paliers, à savoir par lancement d'une fusée à partir d'une autre fusée se déplaçant déjà à une vitesse élevée.

Dans quelle proportion les besoins énergétiques du monde seront-ils couverts au moyen de sources chimiques ? A moins que l'on ne découvre quelque

nouveau procédé très économique permettant d'utiliser des produits chimiques pour produire de l'énergie, ces produits, à l'exception du charbon et du pétrole, serviront principalement à fabriquer des batteries, à faire sauter des roches en temps de paix, et à diverses autres applications représentant au total quelques centaines de milliards de kWh par an. C'est là une énorme quantité d'énergie, mais qui ne représente cependant pas un pourcentage très élevé des 10^{13} kWh dont le monde a besoin.

ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE

Il s'agit vraiment ici d'une source d'énergie non classique, à en juger d'après les normes actuelles. Certains diront peut-être que l'auteur a trop lu Jules Verne. Mais depuis 1930, l'Islande emploie réellement des sources chaudes et des volcans dociles comme sources de chaleur. La ville de Reykjavik reçoit chaque jour plus d'un million de pieds cubes (environ 30 000 m^3) d'eau très chaude. Auparavant, on s'est servi en Toscane des « suffioni », orifices d'où sort la vapeur du sous-sol. Dans cette région, on tire parti de ces phénomènes naturels pour actionner des machines à vapeur depuis 1894.

Nous savons tous que le centre de notre planète est un vaste réservoir de chaleur; en fait, on estime qu'il est constitué de matières en fusion et que seule la pression de la croûte extérieure solidifiée donne à la terre l'apparence d'une masse solide. Cette hypothèse étant admise, quelques calculs tenant compte de la chaleur spécifique et de la masse de la terre donneront des chiffres stupéfiants pour la chaleur enfermée à l'intérieur du globe. Mais, bien que cette chaleur existe, elle n'est pas encore utilisable. Abstraction faite de quelques volcans dociles et de quelques sources chaudes, on n'a guère cherché à puiser dans ce vaste réservoir de chaleur. D'après des expériences faites en Californie, la chaleur libérée par l'intérieur de la terre reviendra plus cher que le charbon ou le pétrole, à moins qu'on ne réussisse à diminuer sensiblement les coûts de forage de puits profonds.

ÉNERGIE DES MERS

Les vagues et le ressac (qui sont l'œuvre du vent), les marées (qui sont provoquées par la lune et dont nous traiterons dans la prochaine section) et la différence de température entre l'eau de la surface et celle des profondeurs, sont autant de formes d'énergie produites par la mer. Il est impossible de prévoir la force des vagues, qui sont le fait du vent; les spécialistes s'accordent à reconnaître que les vagues ne seront pas d'un grand secours pour l'homme et que leur énergie, comme par le passé, aura principalement des effets destructeurs. Tout projet d'utilisation de l'énergie contenue dans les vagues exigera en effet l'emploi de machines massives et ne semble pas devoir être rentable.

Le principe consistant à utiliser la différence de température entre la surface et les profondeurs de l'océan fascine de nombreux savants, parce que cette différence de température existe toujours et qu'une énorme quantité d'énergie est ainsi tenue en réserve dans les mers. Personne cependant n'a tiré d'utilisation commerciale vraiment remarquable de ces réserves de calories. Plusieurs physiciens célèbres, d'Arsonval, Brauer, Le Chatelier, Barjeot, ont poussé l'idée plus ou moins loin, et Georges Claude a même financé de ses propres deniers des expériences pratiques, qui ont eu lieu au voisinage de Cuba, où la différence de température était d'environ 50 °F (28 °C). Mais certains détails de réalisation ne purent jamais être mis au point. Claude ne fut pas satisfait des résultats, et finit par précipiter ses appareils au fond des mers. Il semble toutefois que le principe soit fondé, et il serait peut-être intéressant d'utiliser l'air de l'Arctique, ou de l'Antarctique, en hiver (d'une température de — 45 °C) comme « source froide », et l'océan Arctique (température + 4 °C) comme « source chaude », avec une différence de température de 50 °C. S'il était possible de construire à bon compte une centrale de ce genre pour produire de l'électricité, cette réalisation serait un bienfait incalculable pour les habitants de ces déserts de glace.

ÉNERGIE LUNAIRE

Lorsque nous mentionnons cette source d'énergie, nous ne voulons pas dire qu'il faille aller la chercher dans la lune. Nous pouvons nous dispenser d'un voyage aussi difficile grâce à la force d'attraction de la lune, qui agit à travers l'espace et donne naissance aux marées sur notre planète.

Il existe dans le monde quelques emplacements favorables, où la hauteur des marées atteint de 25 à 50 pieds (7,50 à 15 m). Ce sont, par exemple, l'estuaire de la Severn en Angleterre, et la Baie de Fundy en Nouvelle-Écosse. Plusieurs projets ont été étudiés pour ce dernier emplacement, parmi lesquels le projet Passamaquoddy a des chances d'être réalisé, ce qui doterait le monde d'une centrale marémotrice vraiment importante, fournissant environ 1 milliard de kilowattheures par an. L'Argentine pourrait construire une installation marémotrice d'une capacité annuelle de 5 milliards de kWh, mais le prix de l'énergie produite serait supérieur à celui de l'énergie des centrales thermiques; aussi le projet est-il actuellement en veilleuse.

CONCLUSION

Nous venons de voir que le monde recèle de nombreuses sources d'énergie autres que les sources classiques. Or, à mesure que les combustibles classiques s'épuiseront, que la demande d'énergie mondiale augmentera et que des méthodes moins coûteuses seront mises au point pour exploiter les sources d'énergie nouvelles, celles-ci prendront la place qui leur revient.

Il convient de remarquer que l'importance d'une source d'énergie n'est pas particulièrement attachée

à son caractère gratuit (comme le vent, par exemple, ou l'énergie solaire); elle résulte bien plus étroitement du montant des investissements nécessaires pour lui donner la forme que nous désirons (de l'électricité, par exemple) et de la possibilité que nous avons d'en disposer où et quand nous voulons. C'est ainsi que l'inconvénient principal de l'énergie éolienne en tant que source possible d'électricité est sa nature intermittente, qui nécessite de coûteuses batteries d'accumulateurs. Le fait que nous puissions extraire de la terre le charbon et le pétrole et les utiliser au lieu et au moment où nous en avons besoin, est la raison pour laquelle ils jouent un si grand rôle aujourd'hui. C'est pour une raison analogue que l'énergie nucléaire sera la source d'énergie de l'avenir, puisque le combustible atomique peut être transporté plus facilement que le charbon.

Une conclusion ressort clairement du présent document : tout ce que le monde a accompli jusqu'ici, il l'a accompli à l'aide de l'énergie nucléaire, car le soleil n'est rien autre qu'un immense réacteur de fusion, et que le charbon et le pétrole ne sont rien autre que de l'énergie solaire emmagasinée. Cette même énergie nucléaire, qu'elle provienne de l'énergie solaire ou qu'elle soit engendrée dans des réacteurs de fusion (comme l'a prévu le Président de notre Conférence), fournira probablement une grande partie de l'énergie de l'avenir. Cette probabilité deviendra une certitude si cette même fusion nucléaire ne vient, sous forme de bombe à hydrogène, mettre le point final à l'histoire de la vie humaine sur la terre. Empêcher cette catastrophe est la vocation naturelle de la Conférence qui s'est réunie ici.

BIBLIOGRAPHIE

1. Daniels F., Hubbert M. K., Wigner E. P., *Our Energy Sources*, Physics Today, avril 1949.
2. Pirie N. W., *Power from Leaves*, UNESCO Symposium on Solar Energy and Wind Power in the Arid Zones, octobre 1954, Nouvelle-Delhi, Inde.
3. Daniels F., *Utilisation of Solar Energy*, UNESCO Symposium, voir 2.
4. Putnam P. C., *Energy in the Future*, New-York, 1953.
5. Ba Hli F., *Utilisation of Solar Energy in Burma*, Technical Report of the State Industrial Research Institute, février 1955, Rangoon.
6. AIEE Technical Committee, *Progress in Engineering during 1954*, Electrical Engineering, janvier 1955.
7. News Item, *Solar Battery*, Electrical Engineering, août 1954.
8. Ghai M. L., *Solar Heat for Cooking*, Journal of Scientific and Industrial Research, mars 1953, vol 12, n° 3.
9. Gardner A. L., *Hot Focus Solar Energy Plants for Domestic and Small Scale Industrial Uses*, UNESCO Symposium on Solar Energy and Wind Power, 1954.
10. Ley W., *Engineers' Dreams*, Viking Press, 1954.
11. Golding E. W. et Thacker M. S., *The Utilisation of Wind, Solar Radiation and Other Local Energy Sources for the Development of a Community*, UNESCO Symposium, 1954.
12. Vinal G. W., *Primary Batteries*, Wilwy, 1950.

Sources d'énergie de remplacement (non classiques)

par Farrington Daniels *

La présente communication a pour but d'étudier l'état actuel et les possibilités futures de développement de l'énergie solaire et d'autres sources d'énergie possibles.

Jusqu'à ces derniers temps, l'essentiel du travail était accompli dans le monde par l'action des muscles des hommes et des animaux qui tiraient eux-mêmes leur énergie de l'oxydation des aliments. Les aliments, à leur tour, reçoivent leur énergie de la lumière solaire normale qui leur est fournie par la culture des terres et par le processus de la photosynthèse. Dans les pays industrialisés, les sources agricoles d'énergie ne sont pas en mesure de satisfaire la demande en énergie; c'est ainsi que les produits fossiles de la photosynthèse des âges géologiques précédents sont utilisés dans les machines thermiques, sous forme de charbon, de pétrole ou de gaz. Ces combustibles fossiles sont irremplaçables. Sans être imminent, leur épuisement n'en est pas moins inévitable. Mais l'énergie solaire sera à la disposition des hommes aussi longtemps que ceux-ci seront sur la terre.

L'énergie solaire nous offre donc une possibilité, aujourd'hui et dans l'avenir. Les régions non industrialisées, où vit une grande majorité de la population du monde, doivent disposer d'une énergie plus abondante et moins chère. Actuellement, la transformation en énergie de matières combustibles dans des machines thermiques, représente notre source d'énergie à bon marché la plus classique. Le procédé est commode, car au cours des deux derniers siècles, les savants et les ingénieurs qui ont imaginé ces moteurs vivaient dans des pays industrialisés et l'industrialisation provenait de la facilité avec laquelle on pouvait se procurer du combustible.

Nos connaissances récentes sur l'énergie atomique paraissent très prometteuses. Les combustibles atomiques sont extrêmement légers et, de ce fait, ne posent aucun problème de transport, s'il faut les utiliser dans des régions éloignées des mines de charbon ou des puits de pétrole. Mais l'énergie atomique présente aussi des inconvénients qui lui sont propres : persistance de la radioactivité, organes de commande compliqués, élimination des résidus de la combustion, dimensions minimales critiques des appareils et investissement de capitaux importants. Elle ne peut être utilisée que dans des installations vastes et coûteuses.

L'énergie solaire présente des inconvénients d'un tout autre ordre. La lumière solaire est tellement diffuse et son intensité si faible que les miroirs collecteurs doivent avoir une grande superficie. Or, toute grande surface d'une matière quelconque coûte cher. L'énergie solaire possède toutefois l'avantage d'être répandue sur une grande superficie de la terre; c'est un don gratuit de la nature et elle ne laisse aucun résidu nuisible. Elle agit tout autant sur les pauvres terres incultes que sur les riches cités et les terres cultivées; on peut l'utiliser dans de petites comme de grandes installations. Les appareils qu'elle fait fonctionner peuvent être beaucoup plus petits, plus simples et moins onéreux que les piles atomiques.

Il est probable que l'énergie atomique et l'énergie solaire seront tout d'abord utilisées par les communautés habitant des contrées pauvres en énergie, où les combustibles fossiles sont chers. L'énergie atomique sera produite par des centrales vastes et coûteuses, dont le prix dépassera un million de dollars, tandis que l'on appliquera d'abord l'énergie solaire dans de petites installations des régions rurales non encore industrialisées. Elles se compléteront l'une l'autre. Dans l'avenir, elles pourront faire l'objet d'une plus forte demande dans les régions industrielles, au fur et à mesure que les combustibles fossiles se raréfieront et que leur prix augmentera.

L'emploi des machines thermiques est toujours limité par la loi thermodynamique selon laquelle la fraction de chaleur pouvant être convertie en travail utile est donnée par l'expression $\frac{T_2 - T_1}{T_2}$ dans laquelle T_2 représente la température la plus élevée (la température enregistrée à la chaudière) et T_1 la température la plus basse (celle du condenseur ou de la vapeur usée). C'est une loi rigide qui ne peut être évitée. Des améliorations récentes ont été apportées au rendement des turbines à vapeur et aux moteurs diesel par l'élévation des températures, et donc l'augmentation de T_2. La lumière solaire directe ne peut produire des températures très élevées; on utilise donc des miroirs paraboliques mobiles; mais ceux-ci sont grands et coûteux et le mécanisme nécessaire pour leur faire suivre la

---

Original : anglais.

* Université du Wisconsin, Madison, Wisconsin, États-Unis d'Amérique.

marche du soleil est compliqué et onéreux. Des accumulateurs de chaleur, que l'on utilise au lieu de miroirs, sont un peu moins coûteux, ainsi que nous allons l'exposer.

Au lieu d'utiliser la chaleur solaire pour actionner des machines thermiques, on peut se servir de la lumière solaire pour provoquer des changements photochimiques ou pour produire directement de la photoélectricité. C'est par ces applications que l'on peut le mieux espérer, à plus longue échéance, pouvoir utiliser l'énergie solaire. Peu de travaux de recherche ont été faits pour perfectionner les installations utilisant l'énergie solaire; les pays déjà industrialisés, où se trouvent précisément les savants et les ingénieurs, n'ont guère encouragé ces recherches. Mais, à l'heure actuelle, ils commencent à y prendre un vif intérêt, se rendant compte de l'augmentation rapide de la demande d'énergie et de l'épuisement inévitable des ressources du monde en combustibles. En outre, les pays industrialisés, qui disposent de grands avantages en ce qui concerne la recherche, ont pris conscience des problèmes qui se posent aux collectivités moins industrialisées et de l'aide qu'ils pourraient leur apporter, grâce aux recherches sur l'énergie atomique et sur l'énergie solaire.

Plusieurs conférences ont été organisées pour susciter un mouvement d'intérêt autour de l'utilisation de l'énergie solaire et pour stimuler la recherche. L'une d'elles, patronnée par la United States National Science Foundation et par l'Université du Wisconsin, a eu lieu en 1953 [1]*. La conférence est parvenue aux conclusions générales suivantes : le problème du chauffage domestique par l'énergie solaire est presque résolu, la distillation de l'eau de mer par l'énergie solaire semble être du domaine des possibilités, les machines destinées à utiliser l'énergie solaire sont difficiles à réaliser du point de vue économique; on pourrait toutefois utiliser un petit moteur à faible rendement, s'il était possible d'en construire un. Il semble que la photochimie et la photoélectricité soient, parmi les réalisations à long terme, les applications qui permettent les plus grands espoirs. Le Gouvernement indien et l'UNESCO ont organisé à ce sujet une conférence en 1954 (les comptes rendus en seront publiés par l'UNESCO); on y a souligné la nécessité de construire des machines, des fourneaux et des réfrigérateurs simples et peu coûteux. Une autre conférence aura lieu à Phoenix, dans l'Arizona, en novembre 1955 qui mettra l'accent sur les aspects économiques et industriels de l'énergie solaire.

RESSOURCES D'ÉNERGIE SOLAIRE UTILISABLES

La chaleur solaire totale fournie à toutes les terres du monde est très supérieure à toute l'énergie imaginable dont pourrait avoir besoin une civilisation quelconque. Aux États-Unis, l'énergie consommée pour les transports, l'industrie, le chauffage, etc. s'élève à environ 150 millions de calories, soit 174 kilowattheures de chaleur, par personne et par jour. D'autre part, le soleil dispense, aux États-Unis, sous forme de chaleur et de lumière, un total qui est de l'ordre de 270 milliards de calories ou 313 000 kilowattheures de chaleur, par personne et par jour. Il convient de souligner immédiatement que cette énergie ne peut être actuellement utilisée comme force. Elle se trouve sous forme de chaleur à basse température et de lumière et il n'est pas aisé de l'accumuler, de la transporter et de la convertir en travail.

Le tableau 1 donne, en unités diverses, les équivalences de la radiation solaire.

Tableau 1

Rayonnement solaire journalier reçu par 100 m² de surface plane (en supposant une petite calorie par cm², par minute, pendant huit heures par jour)

Chaleur	
Milliers de calories de chaleur par jour	480 000
Milliers de calories de chaleur par heure de soleil	60 000
Unités thermiques britanniques de chaleur par jour	1 900 000
Unités thermiques britanniques de chaleur par heure de soleil	237 500
Kilowattheures de chaleur par jour	558
Kilowatts de chaleur : quantité moyenne pendant 8 heures de soleil	69
Kilowatts de chaleur : quantité moyenne par journée de 24 heures	23
Équivalence en kilogrammes de houille grasse	66
Équivalence en livres de houille grasse	146
Équivalence en kilogrammes de bois	120
Équivalence en livres de bois	264
Équivalence en litres d'essence	54
Équivalence en gallons (des États-Unis d'Amérique) d'essence	14
Équivalence en pieds cubes de méthane	1 900
Maximum théorique d'eau distillée par heure de soleil, avec un rendement de 100 pour cent	97
Équivalence en travail sur la base d'un taux de conversion de 10 pour cent	
Kilowattheures de travail par jour	56
Chevaux-vapeur/heure de travail par jour	75
Kilowatts : moyenne par journée de 24 heures	2,3
Kilowatts : moyenne pour 8 heures de soleil	7
Équivalence en travail sur la base d'un taux de conversion de 5 pour cent	
Kilowattheures de travail par jour	28
Chevaux-vapeur/heure de travail par jour	38
Kilowatts : moyenne par journée de 24 heures	1,2
Kilowatts : moyenne pour 8 heures de soleil	3,5

Les calculs sont effectués dans l'hypothèse que 1 cm² reçoit une petite calorie par minute, pendant

* Les numéros entre crochets renvoient à la bibliographie qui figure à la fin du mémoire.

8 heures ou 480 minutes de soleil. Il est certain que cette valeur est sujette à de grandes variations selon la latitude, le climat et les saisons; elle constitue toutefois un chiffre commode pour les calculs et se rapproche assez bien de la valeur moyenne pour les régions ensoleillées. Pendant l'hiver, dans les régions nordiques, où le ciel est nuageux, ces valeurs devraient être réduites des trois-quarts.

L'énergie solaire frappant une surface de 100 m² a été choisie comme unité parce qu'il est facile de se la représenter : c'est la surface du toit d'une habitation carrée de 10 m de côté (32,8 pieds). La radiation par acre s'obtient en multipliant par 40,47 la radiation par 100 m²; on trouve la radiation par pied carré en divisant cette quantité par 1 076. Les taux de 5 et 10 pour cent, choisis pour la conversion de la chaleur en travail ou en électricité utiles, semblent constituer une estimation convenable de ce que l'on peut espérer obtenir à l'aide de machines thermiques solaires et de la batterie solaire de la Bell Telephone.

Le rayonnement solaire est certainement très faible dans les régions arctiques et antarctiques, au cours de l'hiver, mais au cours de l'été il a lieu pendant des périodes anormalement longues. Les basses températures, ainsi que le sol gelé ou l'eau froide pourraient être d'un bon appoint pour réaliser de grandes différences de température.

COLLECTEURS DE CHALEUR SOLAIRE

Les miroirs paraboliques en verre sont très efficaces, car ils concentrent la lumière sur une petite surface et donnent ainsi une température élevée. En effet, on a obtenu des températures dépassant 3 000 °C, lors de travaux d'expérimentation [2, 3, 4]. Trombe a construit un miroir de 90 m², composé de 3 500 miroirs en verre, dont chacun est courbé par une vis de poussée. La plupart des machines thermiques solaires utilisées jusqu'ici ont pris la forme de miroirs paraboliques, afin de donner une valeur intéressante à $\frac{T_2 - T_1}{T_2}$. Tous les mécanismes permettant de suivre la marche du soleil, à la manière d'un télescope astronomique, sont encombrants et coûteux.

De longs miroirs cylindriques ayant une surface réfléchissante parabolique sont plus simples à fabriquer que les miroirs paraboliques à surface circulaire. Ils présentent en outre l'avantage de pouvoir être montés selon l'angle convenable, sur un axe nord-sud, et de prendre aisément l'inclinaison voulue pour suivre la marche du soleil dans le ciel. La chaudière placée au foyer du miroir peut être déplacée pour suivre le soleil. Le problème serait fort simplifié s'il était possible de construire des miroirs fixes, en position définitive; mais dans ce cas ils ne pourraient fonctionner que pendant une courte partie du jour. Les miroirs à foyer ne sont d'aucune utilité lorsque des nuages interceptent la lumière solaire directe. Les vents violents les exposent à certains risques. Dans quelques régions, telles que l'Inde, où les vents violents sont rares, on pourrait utiliser de grands miroirs; mais, dans des régions à grand vent, on ne peut employer que des miroirs de faibles dimensions et il faut multiplier le nombre d'installations.

Le collecteur à surface plane [5, 6, 7, 8] est plus simple à construire et peut fonctionner par temps modérément nuageux. Il ne comprend aucune partie mobile et ne peut donner de températures aussi élevées que celles obtenues avec les installations à foyer; il peut toutefois produire des températures dépassant le point d'ébullition de l'eau.

Le collecteur à surface plane procède du même principe que la serre; une ou plusieurs plaques de verre sont disposées en face du collecteur de chaleur. La lumière solaire traverse le verre transparent et chauffe la matière absorbante, qui peut-être de l'eau ou une surface métallique noircie, mais la restitution des radiations par la matière chaude se fait dans la bande extrême des infra-rouges et est absorbée par la couverture de verre. Ainsi donc, la chaleur radiante demeure captive. Plusieurs plaques sont préférables à une seule, mais des réflexions répétées de la surface de ces plaques en diminuent le rendement. Il semble que trois ou quatre plaques constituent un nombre optimum. En traitant la surface du verre à l'aide d'une pellicule d'une épaisseur égale au quart de la longueur d'onde de la lumière, on diminue ces pertes de réflexion [6, 7].

En Californie et en Floride, on utilise des tuyaux noircis disposés sur le toit, pour produire de l'eau chaude pour la consommation domestique. On a fait l'essai de collecteurs à feuilles métalliques plates et noircies contenant de l'eau [8].

Un verre plat d'une surface d'environ 100 m² peut coûter quelque 250 dollars, mais les miroirs paraboliques coûteraient beaucoup plus cher. Les miroirs métalliques sont également onéreux. Les progrès réalisés dans la fabrication des matières plastiques permettent actuellement de construire des collecteurs d'énergie solaire moins chers. On peut obtenir des feuilles en matière plastique de 0,02 mm d'épaisseur pour le dixième du prix du verre. On en trouve sur le marché avec des propriétés variées et à des prix très divers. Il semble qu'on puisse fonder de grands espoirs sur eux, mais leur succès dépendra des essais en cours sur leur résistance aux conditions atmosphériques dans différents climats. Il est probable qu'ils pourront durer trois ans. On peut maintenant se procurer le plastique « Mylar », qui est d'un prix raisonnable; sa surface est recouverte d'une pellicule en aluminium qui a d'excellentes propriétés réfléchissantes. Il faudra effectuer des recherches intensives sur les points suivants : prix de revient pour la production en masse, absorption et réflexion de la lumière, résistance à l'eau et à la lumière solaire. Il sera en outre nécessaire d'essayer des pellicules en matière plastique à couches multiples.

Les collecteurs en matière plastique peuvent se présenter sous forme de tubes larges et plats contenant de l'eau colorée en noir afin d'absorber les radiations solaires. Ils doivent être disposés presque à plat, car ils ne résistent pas à de fortes pressions hydrostatiques. Les collecteurs peuvent être noircis à la base ou partiellement remplis d'une matière légère absorbant la chaleur et sur laquelle on fait passer un courant d'air.

ACCUMULATION DE LA CHALEUR

Il existe trois moyens d'emmagasiner la chaleur solaire radiante : des réservoirs d'eau chaude, des couches de galets et des changements de phases ou modifications de la structure chimique. Les réservoirs à eau sont simples et de fabrication normalisée. Heywood [8] communique des données expérimentales sur un collecteur à eau de 10 pieds carrés (environ 0,93 m^2) utilisé à Londres; Anderson, Hottel et Whillier [9] étudient l'équipement nécessaire pour accumuler la chaleur. L'accumulation de chaleur dans des réservoirs d'eau chaude est probablement la méthode la plus simple et la plus normale. Pour les petits réservoirs, les pertes de chaleur sont importantes, mais on peut les réduire en utilisant de grands réservoirs bien calorifugés. Les pertes causées directement par conduction de l'eau sont faibles comparées à celles provoquées par la convexion. Il faudrait mettre au point des installations améliorées réduisant la circulation interne de l'eau.

L'échange thermique entre une couche de galets ou une masse de petits cailloux et un courant d'air qui les traverse est très rapide. Une masse de gravier d'un diamètre moyen de 2 à 3 pouces (5 à 8 cm), remplissant une chambre imperméable à l'air, constitue un bon moyen d'accumuler la chaleur. Ces matières sont peu onéreuses, la capacité d'accumulation de chaleur est grande et les pertes par conduction sont faibles, les points de contact entre les morceaux ayant une surface très réduite. Löf [10] a étudié l'accumulation dans des couches de galets. Elles ne requièrent que peu de soins et peuvent être placées dans des chambres souterraines à parois en ciment.

La chaleur de fusion d'un solide ou un changement de la structure cristalline offrent le moyen d'accumuler la plus grande quantité de chaleur. Un kilogramme d'eau à 0 °C dégagera 80 000 calories de chaleur si la température tombe au-dessous de 0 °C et si l'eau se transforme en glace. Un kilogramme de sulfate de sodium hydraté ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ absorbera 58 000 calories de chaleur si la température dépasse 32,3 °C, température à laquelle le sel se déshydrate et devient Na_2SO_4. Cette chaleur est ensuite dégagée si la température tombe au-dessous de 32,3 °C. Aussi longtemps que la température de l'air ambiant se maintient aux environs de 32,3 °C, la perte de chaleur sera très faible au cours de la conservation. S'il fallait accumuler la même quantité de chaleur dans un kilogramme d'eau, il faudrait porter sa température à 58 °C au-dessus de celle de l'air ambiant; en outre, les pertes de conservation seraient énormes. Il existe d'autres sels hydratés dont la transformation s'effectue à d'autres températures [11]. Les transformations de la structure chimique et les changements de phases sont excellents en ce qui concerne les pertes de chaleur et l'accumulation de chaleur par kilogramme ou par litre. Mais une sérieuse difficulté subsiste : la vitesse de cristallisation est faible, et, à cause du manque d'agents convenables pour former des noyaux, la nouvelle phase pourrait ne pas apparaître à la température convenable, lors du refroidissement. Le refroidissement supplémentaire peut empêcher la restitution normale de la chaleur, si la matière atteint une température inférieure à la température de transition. En outre, la cristallisation sur les parois du réservoir peut réduire l'efficacité du transfert de la chaleur; une séparation des phases pourrait se produire, à moins qu'on agite la substance. Il serait intéressant de poursuivre les recherches en vue d'améliorer l'accumulation chimique de la chaleur.

MACHINES UTILISANT L'ÉNERGIE SOLAIRE

Ces machines ne sont pas d'invention récente. En 1884, lors d'une exposition à Paris, une presse d'imprimerie fonctionnait à l'aide d'une machine à vapeur dont la chaudière était chauffée par le rayonnement solaire concentré par un miroir parabolique. En 1913, une machine d'une puissance de 20 chevaux-vapeur, actionnée par l'énergie solaire, pompait de l'eau d'irrigation du Nil. Un long miroir cylindrique concentrait la lumière solaire sur un tuyau qui produisait de la vapeur. En octobre 1954, au cours de la conférence sur l'énergie solaire et l'énergie éolienne, qui a eu lieu à l'Institut national indien de physique, on a effectué des démonstrations de production de vapeur à l'aide de machines utilisant l'énergie solaire. Lors de cette conférence, V. Baum a aussi décrit le fonctionnement en U.R.S.S. de machines utilisant des réflecteurs paraboliques.

Abbot [12] a fait les plans d'un moteur de deux chevaux-vapeur, utilisant un miroir cylindrique parabolique de 11 pieds sur 10 (environ 3,30 m sur 3 m), tournant autour d'un axe parallèle à la terre. La surface, constituée par une feuille d'aluminium, réfléchit la lumière solaire sur un tube à vide à chemise en pyrex contenant un liquide noir, « Arochlor », qui bout à 355 °C. Ce liquide, porté à 227 °C, chauffe une chaudière hydraulique qui produit de la vapeur à 25 atmosphères. Abbot estime avec prudence que la production sera de 1,5 cheval-vapeur, avec un rendement général de 11,7 pour cent, et que le prix de vente de la chaudière solaire sera d'environ 1 000 dollars. Il serait intéressant d'effectuer un essai avec une machine de cette espèce, dans des conditions normales.

Hottel [8] préconise un collecteur à plaques planes, constitué par quatre feuilles de verre, qui

peut emmagasiner la chaleur à une température de 230 °F (110 °C). Dans l'hypothèse où la température la plus basse est de 100 °F (37,8 °C), où le climat est semblable à celui d'El Paso (Texas) et où la machine a un rendement thermodynamique conforme au principe de Carnot, il estime que la production sera approximativement de 77 kilowatts de travail par acre (environ 40 ares), si la machine fonctionne continuellement 24 heures sur 24. Il calcule que le prix de revient de la vapeur produite à l'aide d'une installation utilisant l'énergie solaire et coûtant 2 dollars par pied carré, (environ 0,093 m²) sera de 0,013 dollar par kilowattheure. Des chiffres comparables indiquent que l'on pourrait produire de la vapeur à 0,005 dollar par kilowattheure à l'aide de charbon coûtant 10 dollars la tonne (environ 907 kg) ou à l'aide de pétrole coûtant 5 cents le gallon (environ 3,78 litres). Ces prix représentent environ le triple du prix de revient actuel de l'énergie produite aux États-Unis à l'aide des combustibles classiques. Ces machines présentent néanmoins de l'intérêt pour les régions qui manquent d'énergie et où il est difficile de se procurer du charbon et du pétrole. Il faut construire des installations expérimentales, en s'attachant particulièrement à mettre au point des collecteurs d'énergie solaire moins onéreux. Comparé au coût des installations expérimentales de l'énergie atomique (qui doivent nécessairement être de grandes dimensions et qui nécessitent un équipement de sécurité onéreux), le coût de la construction et de l'essai de petites installations expérimentales utilisant l'énergie solaire est très faible.

On devrait également effectuer des recherches sur d'autres types de machines utilisant l'énergie solaire. Des liquides à bas point d'ébullition, comme l'acétone, l'alcool ou le « fréon », pourraient bouillir plus facilement que l'eau, avec des collecteurs moins chers et sans requérir de miroirs pour concentrer la lumière sur le foyer. Toutefois cette simplicité plus grande et des investissements plus faibles sont compensés par un rendement thermodynamique inférieur. Il faut tenir compte de ces deux facteurs en se souvenant qu'un rendement inférieur signifie un collecteur plus vaste et des investissements plus importants.

Les appareils à air chaud fonctionnant à haute température par concentration du rayonnement offrent l'avantage de la simplicité, d'un emploi et d'un entretien faciles, mais ils sont encombrants et lourds.

Il serait intéressant d'étudier des machines à fonctionnement intermittent; un gaz qui absorbe la chaleur se dilate s'il est exposé à la lumière solaire et se contracte lorsque celle-ci n'agit plus. Un écran à fentes animé d'un mouvement de va-et-vient provoque une succession d'ombre et de lumière et la dilatation et la contraction d'un tube souple. J. A. Duffie et D. N. De Young, de l'Université du Wisconsin, ont fait fonctionner un modèle de laboratoire de ce type pour pomper de l'eau. Ici encore, une estimation nécessite qu'on tienne compte à la fois de la simplicité de l'appareil et de son faible rendement. Mais intervient un nouveau facteur dans les estimations : le « combustible » (l'énergie solaire) est pratiquement gratuit et, dans les régions isolées, non industrialisées, où manquent charbon, pétrole et électricité, la demande de petites installations génératrices d'énergie est forte. La légèreté des machines qui permet de les transporter avec des moyens primitifs dans des régions éloignées est essentielle, comme la simplicité du fonctionnement, de l'entretien et des réparations. Il est possible d'investir un certain capital dans ces appareils, s'ils peuvent partiellement remplacer l'énergie animale et permettre de libérer des terres pour la production de denrées alimentaires.

Un autre point doit être pris en considération, si l'on compare l'utilisation de l'énergie solaire dans les régions industrialisées et dans les autres. Dans ces dernières, la main-d'œuvre peut être assez abondante pour qu'on puisse modifier à la main l'angle des miroirs qui doivent suivre la marche du soleil et enlever fréquemment la poussière qui se dépose sur les miroirs. On peut ainsi éviter l'immobilisation de capitaux qu'entraînerait un équipement automatique. Ce n'est pas le travail fourni par l'homme, par litre d'essence, ou par livre de charbon qui constitue ici le critère important, mais plutôt le travail correspondant au capital investi et la simplicité de l'appareil.

ACCUMULATION DE L'ÉNERGIE

Un des inconvénients manifestes de l'énergie solaire est son caractère intermittent. Il est impossible de faire briller le soleil pendant la nuit, ou lorsque le ciel est très nuageux. Cet inconvénient disparaît s'il s'agit de pomper de l'eau d'irrigation; mais la production d'électricité pour éclairer maisons et villages (rôle probablement secondaire parmi les services importants que peut rendre l'énergie solaire) impose l'accumulation d'énergie.

Il y a, à ce problème, une solution évidente : amener de l'eau dans un réservoir surélevé et la faire retomber pendant la nuit sur une turbine hydraulique actionnant une dynamo. Ce procédé a déjà été appliqué. Pendant de nombreuses années, une mine du Nouveau-Mexique a été éclairée, jour et nuit, par le courant produit par une dynamo et un appareil actionnés par l'énergie solaire. J. A. Harrington a concentré, à l'aide d'un miroir parabolique, la lumière solaire, sur une chaudière qui actionnait une machine à vapeur pompant de l'eau dans un réservoir de 5 000 gallons (environ 19 000 l) situé à 20 pieds (environ 7 m) au-dessus du sol. Le plan général de ce dispositif d'accumulation d'énergie dans un réservoir à eau est actuellement appliqué sur une grande échelle à Austin (Texas). L'énergie hydraulique et celle de la vapeur sont toutes deux utilisées pour produire de l'électricité. Lorsque les lignes de force ne fonctionnent pas à plein rendement, la centrale thermique est utilisée pour amener l'eau du réservoir inférieur au réservoir supérieur

de l'installation hydraulique, permettant ainsi d'en utiliser l'énergie lors de la prochaine pointe. Ce mode d'exploitation peut acquérir une importance de plus en plus grande dans les régions chaudes, où la demande en air conditionné, aux jours de grande chaleur, provoque des charges de pointe excessives. On peut penser que, si l'énergie solaire gagnait en importance, les collectivités situées à proximité d'un plateau élevé où l'on peut construire aisément un réservoir à eau permettant d'accumuler l'énergie hydraulique, seraient favorisées. On pourrait aussi utiliser des mines abandonnées, en installant une turbine hydraulique dans le fond; l'eau remontée par pompage au cours de la journée, retomberait pendant la nuit. Les villes situées au bord de l'océan pourraient utiliser un système de cloche à plongeur à chambres profondes vidées par pompage pendant la journée.

De grandes installations de production d'énergie exigeraient toutefois la construction de réservoirs vastes et coûteux pour l'alimentation en eau des turbines. Il est également possible d'accumuler la chaleur dans des liquides contenus dans de grands réservoirs bien calorifugés. Étant donné qu'un rendement élevé exige des températures élevées, les pertes de chaleur sont considérables si l'énergie doit rester accumulée pendant de longues périodes.

On peut raccorder les appareils utilisant l'énergie solaire à un réseau d'interconnexion alimenté également par des centrales thermiques chauffées au charbon ou au pétrole et réduire ainsi la consommation de combustible pendant les beaux jours ensoleillés.

Les batteries d'accumulation constituent en principe le système idéal. On les a utilisées dans des fermes des États-Unis, en même temps que des moteurs à essence, pour produire du courant électrique, mais elles sont aujourd'hui remplacées par l'électricité fournie par des lignes d'électrification rurale. La batterie à électrodes en plomb, que l'on adapte aux automobiles, a atteint un stade élevé de perfectionnement pour l'emploi particulier auquel elle est destinée; son prix est cependant trop élevé et elle exige trop de soins, pour que l'emploi s'en généralise dans les régions non industrialisées. Toutefois, avec des appareils à rayonnement solaire, il n'est pas nécessaire que la batterie soit puissante, robuste, ou de petites dimensions. Elle ne doit pas fournir un fort ampérage et ne doit pas être instantanément ni entièrement réversible. Si l'on supprime ces caractéristiques actuellement indispensables de nos batteries à électrodes en plomb, il est possible que l'on découvre des systèmes à base de nouveaux produits chimiques et de nouveaux types d'électrodes. Pour que leur emploi puisse se généraliser, il ne faudrait pas que leur prix dépasse le dixième de celui des batteries actuelles à électrodes en plomb. En outre, une main-d'œuvre abondante permettrait d'effectuer à la main certaines opérations simples, ce qui ne peut être envisagé dans les régions industrialisées.

CHAUFFAGE DOMESTIQUE

Aux États-Unis, le tiers environ de la consommation de combustibles va au chauffage domestique. Au fur et à mesure que se généralise l'air conditionné dans les régions méridionales, on utilise une plus grande quantité d'énergie. L'emploi de l'énergie solaire pour une part du chauffage domestique et du conditionnement de l'air permettra de conserver nos réserves de combustibles en voie d'épuisement.

Un rapport, préparé en 1925 [12*a*], estimait qu'en 1975 il existerait aux États-Unis d'Amérique (principalement dans la moitié sud du pays) une demande d'énergie solaire pour le chauffage de 13 millions d'habitations. A l'heure actuelle, le nombre de maisons ainsi chauffées n'atteint probablement pas la dizaine, mais on pense que les progrès seront rapides.

Comme nous l'avons indiqué plus haut, il existe trois types principaux d'accumulation [5, 6, 7] : l'eau chaude, les couches de galets et les modifications chimiques. M^me^ Maria Telkes [13] a conçu et construit, près de Boston, une maison où de grands récipients, contenant du sulfate de soude et de l'eau, accumulent une chaleur suffisante pour couvrir une période de dix jours de ciel nuageux.

On a construit et essayé une autre maison chauffée par l'énergie solaire, à Boston (Massachusetts) [14] (système à eau chaude).

Comme dans le cas des moteurs solaires, il faut mettre au point un appareil simple et de prix réduit pour pouvoir utiliser l'énergie solaire au chauffage de petites maisons et à la cuisine, là où il n'est pas facile de se procurer du charbon et du pétrole. Un collecteur et un accumulateur, même de faible rendement, seraient bien accueillis même si certaines manipulations devaient se faire à la main. Il serait peut-être possible de recueillir et d'accumuler l'énergie dans des sacs en matière plastique mince. Dans l'Inde, pour 14 dollars, on construit en série des réchauds munis de miroirs paraboliques en aluminium produisant une énergie de 350 watts. Leur usage ne s'est pas répandu. Si l'on parvient à fabriquer pour moins de 5 dollars un réflecteur pratique composé d'un miroir de matière plastique recouvert d'une mince pellicule d'aluminium avec une bonne surface réfléchissante, il rendra des services certains. L'Université du Wisconsin a effectué des essais dans ce sens. La substitution de l'énergie solaire au bois de chauffage, au petit bois, à l'herbe et à la bouse de vache pourrait non seulement rendre la vie plus facile, mais aussi économiser de la main-d'œuvre et du temps dans certaines régions, et permettre par surcroit d'améliorer la fertilité du sol et de diminuer l'érosion.

REFROIDISSEMENT PAR L'ÉNERGIE SOLAIRE

Dans nombre de régions où l'ensoleillement est prolongé, le refroidissement des habitations est plus important que leur chauffage. Il est nécessaire de

répandre l'emploi de la réfrigération pour préserver les aliments.

On peut, en principe, utiliser l'énergie solaire, pour le refroidissement, d'au moins trois manières. On peut remplacer les moteurs électriques qui provoquent la réfrigération mécanique en liquéfiant et en faisant évaporer un liquide à bas point d'ébullition, par des appareils utilisant l'énergie solaire. Lors de la conférence sur l'énergie solaire, qui s'est tenue en Inde, en 1954, V. Baum (U.R.S.S.) a exposé un procédé qui permet la production de 250 kilogrammes de glace par jour à l'aide d'un appareil utilisant l'énergie solaire. Pour le système de réfrigération à absorption (dans lequel la chaleur fait passer d'un compartiment à l'autre du gaz ammoniac, ou autre gaz, pouvant être absorbé ou condensé), le fonctionnement par l'action de l'énergie solaire offre des avantages : il n'y a pas de parties mobiles et le coefficient de rendement est élevé. Peut-être pourrait-on espérer produire près d'une « tonne » de réfrigération (12 000 Btu par heure) pour un collecteur de 10 m² de surface. Avec une installation de dimensions dépassant la moyenne, on peut accumuler assez de liquide pour refroidir par vaporisation longtemps encore après le coucher du soleil. La chaleur solaire permet de dessécher du bromure de lithium ou autres corps déshydratants, de manière qu'ils puissent réabsorber de l'humidité et refroidir une chambre communicante, par vaporisation d'eau.

Le rayonnement nocturne, vers le ciel, constitue une source de froid que l'on devrait étudier, surtout dans les régions où les journées sont chaudes et les nuits fraîches. Le problème de l'accumulation de la chaleur, dont nous avons déjà parlé, présente ici une certaine importance.

On peut utiliser des machines à réfrigération mécanique, non seulement pour refroidir, mais aussi pour chauffer. On peut convertir l'électricité directement en chaleur en la faisant passer par une résistance chauffante; mais on peut produire trois à quatre fois plus de chaleur en faisant agir l'électricité, sous forme de travail, dans une machine, pour porter la chaleur à basse température de l'eau ou de la terre à une température plus élevée dans une « pompe thermique ». L'énergie solaire peut servir comme source de chaleur. Bien que l'on puisse employer le même appareil pour réchauffer et pour refroidir et que l'on puisse réaliser une forte économie en combustibles, les « pompes thermiques » exigent de gros investissements de capitaux et il faut, soit un grand réservoir d'accumulation de chaleur, sous forme d'eau ou de terre, soit une installation d'accumulation.

CONVERSION PHOTOCHIMIQUE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE EN TRAVAIL

Du point de vue de la thermodynamique, la différence de température donnée par l'expression $\frac{T_2 - T_1}{T_2}$ limite les méthodes thermiques de conversion de l'énergie solaire en travail. Par contre, l'utilisation de l'énergie solaire sous forme de lumière au lieu de chaleur n'est pas ainsi limitée. Il semblerait facile, à première vue, de provoquer une réaction chimique endothermique réversible, par l'action de la lumière solaire, et de conserver le produit obtenu. Par la suite, les produits pourraient être mélangés et reconstitueraient les produits originaux avec dégagement d'une quantité de chaleur égale à celle absorbée au cours de la réaction photochimique. Des piles convenables de ce type sont rares. En général, la réversion s'accomplit d'elle-même immédiatement; le résultat net est la conversion directe de la lumière solaire en chaleur pendant que la lumière est absorbée. Par exemple, la lumière dissocie les molécules d'iode, I_2, pour donner des atomes d'iode; mais les atomes se recombinent immédiatement. La réaction photochimique des perchlorates céreux et cérique dans l'eau dégage de l'hydrogène et de l'oxygène [15] qui peuvent être conservés et brûlés plus tard pour donner une forte quantité de chaleur à température élevée, et faire fonctionner un moteur. Toutefois, pour que cette réaction s'accomplisse, il faut de la lumière ultraviolette à ondes courtes et il n'en existe pour ainsi dire pas dans la lumière solaire; jusqu'ici, elle n'a fait l'objet que de travaux de micro-laboratoire. Il faudrait effectuer des recherches de base pour découvrir d'autres réactions de ce type utilisant la lumière solaire. Les recherches pourraient porter sur un grand nombre de liquides et de solutions colorées et même des solides cristallins pour trouver des réactions photochimiques convenables. Il y a tout lieu d'espérer que ces recherches seront fructueuses, car on sait que, chez les végétaux, la photosynthèse s'effectue réellement et qu'elle nous procure la totalité de nos aliments et de nos combustibles.

LA PHOTOSYNTHÈSE

Par la photosynthèse, l'anhydride carbonique et l'eau se combinent pour donner des hydrates de carbone, en présence de chlorophylle verte et sous l'action de la lumière solaire. La réaction est la suivante :

$$CO_2 + H_2O + \text{chlorophylle} + \text{lumière} = (H_2CO) + O_2$$

L'énergie nécessaire pour provoquer la réaction est d'au moins 112 000 calories par molécule; lors d'essais effectués en laboratoire sur des algues, on a trouvé qu'il fallait 8 à 10 unités de rayonnement ou « photons » pour produire une molécule d'hydrate de carbone [16]. En lumière rouge, ceci correspond à l'accumulation de 28 pour cent environ de l'énergie absorbée. Cette chaleur est restituée lorsque l'hydrate de carbone est brûlé dans l'oxygène de l'air. Il est probable qu'au cours du processus se produit une réduction de l'anhydride carbonique. Une molécule de chlorophylle est activée par l'absorption d'un photon; elle transmet ensuite son énergie à l'eau en libérant un atome d'hydrogène qui réagit avec l'anhydride carbonique. Un second

photon active une seconde molécule de chlorophylle, libérant un second atome d'hydrogène qui provoque une nouvelle réduction pour donner de l'hydrate de carbone, et ainsi de suite. Au cours d'une saison, les récoltes moyennes n'emmagasinent qu'environ 0,2 pour cent de l'énergie solaire dispensée au cours de l'année; cette faible absorption s'explique par le fait que la croissance n'a lieu que pendant un tiers de l'année et que le rayonnement est surtout formé de rayons infra-rouges que la chlorophylle n'absorbe pas. En outre, au cours des essais en laboratoire, la quantité d'anhydride carbonique est portée à 3 pour cent au lieu de 0,03 pour cent contenu normalement dans l'air, et, ce qui est le plus important, la lumière solaire est beaucoup trop lumineuse pour que l'absorption soit optimale.

On a cherché à augmenter le rendement de la photosynthèse par rapport à celui de l'agriculture, en cultivant des algues dans des sacs en matière plastique [17, 18]. Il semble possible de multiplier les rendements par 10 ou par 20, mais cela nécessitera de gros investissements de capitaux; de plus, la récolte des algues pose de sérieux problèmes. La contamination par des organismes qui ne passent pas par le processus de la photosynthèse et une chaleur trop forte constituent des difficultés supplémentaires. On dispose maintenant de nouvelles variétés d'algues qui se développent bien dans l'eau chaude; elles présentent assez d'intérêt pour qu'on leur consacre de nouvelles études. On pourrait utiliser les terres en friche pour cultiver les algues sur une grande échelle, mais on estime que le prix de revient est prohibitif, si on veut s'en servir comme combustible; il est possible que des recherches plus poussées permettent d'envisager leur emploi alimentaire dans certaines régions.

LA PHOTOÉLECTRICITÉ

Si une réaction photochimique en solution s'effectue de telle manière que des électrons sont libérés, ceux-ci peuvent parfois être repris par une électrode inerte dans la solution et conduits le long d'un fil, comme courant électrique, pour être libérés à l'autre électrode. Il est difficile d'accumuler l'énergie produite, dans la plupart des réactions photochimiques, car les produits formés réagissent tellement qu'ils se recombinent immédiatement. Les cellules photogalvaniques stabilisent les intermédiaires en éliminant les électrons inutiles et produisent en même temps un courant électrique utile. Rabinovitch [19] a clairement défini le problème et suggéré certaines recherches à faire sur les cellules photogalvaniques.

Le plus grand espoir que donne l'utilisation de l'énergie solaire s'est révélé de manière inattendue dans un domaine de la recherche fondamentale, la physique de l'état des solides, qui semblait n'avoir aucun rapport avec l'énergie solaire.

Depuis de nombreuses années, on connaît les cellules photovoltaïques; elles ont trouvé un vaste champ d'application dans les posemètres utilisés en photographie. En voici des exemples : l'oxyde de cuivre sur les films métalliques, les cellules de sélénium, les cellules de cadmium–sulfure de cadmium et autres produits semi-conducteurs. Ils offrent une possibilité de conversion simple de la lumière solaire en électricité [20]. La théorie relative à ces cellules photovoltaïques a évolué graduellement; on admet que deux semi-conducteurs différents, mis en contact et exposés à la lumière, peuvent libérer des électrons à une électrode. Ces électrons peuvent circuler autour d'un circuit extérieur en accomplissant un travail électrique et retourner à l'autre électrode, sans qu'aucune partie mobile intervienne et sans consommer une matière quelconque de la cellule. Jusqu'à une date toute récente, la conversion de l'énergie de la lumière par des cellules photovoltaïques a été faible (moins de 1 pour cent).

En avril 1954, le laboratoire de la société Bell Telephone a annoncé la construction de sa batterie solaire chargée de silicium purifié, traité spécialement, et qui peut convertir la lumière solaire en énergie électrique, avec un rendement de 6 pour cent [21]. On avait calculé que, en pleine lumière, un yard carré (0,83 m^2) de ces semi-conducteurs donnerait 50 watts. Un an plus tard, des améliorations ont porté ce rendement à 8 pour cent et parfois même à 11 pour cent. Des plans sont en cours d'exécution pour utiliser les batteries solaires en vue de produire de l'énergie électrique dans les stations amplificatrices des lignes téléphoniques rurales.

La batterie de la Bell Telephone est formée de deux disques minces de silicium très pur en contact l'un avec l'autre. L'un est rendu négatif (couche *n*) par l'introduction d'une impureté d'arsenic dans le réseau du silicium. L'arsenic, qui est pentavalent, représente une anomalie dans le réseau de silicium qui est tétravalent; le cinquième électron erre dans le réseau de silicium, laissant des charges positives sur les atomes d'arsenic. L'autre disque de silicium contient comme impureté du bore trivalent, qui enlève des électrons, créant ainsi des vides positifs et formant la couche *p*. Les électrons négatifs sont associés aux vides positifs, tous étant mobiles. Un équilibre s'établit au point de contact *p-n* entre les deux disques de silicium. Dans tout le spectre visible et dans les infra-rouges à ondes courtes, la lumière est capable, jusqu'à 1,02 électron-volt, de séparer les électrons négatifs des vides positifs de ces bandes de silicium; les charges séparées rompent l'équilibre au point de contact *p-n*. L'excès d'électrons passe le long du fil sous forme de courant électrique et les électrons se neutralisent à l'autre électrode avec les vides positifs qui s'y sont rendus.

Le silicium est un des éléments les plus abondants; il est comparativement bon marché à 98 pour cent de pureté. Il est nécessaire de le rendre extrêmement pur avec une proportion d'impuretés inférieure à 1 sur 10 millions. On y parvient par fusion localisée, processus au cours duquel un cristal pur est extrait lentement d'une couche en fusion de manière à

chasser les impuretés vers l'extrémité du barreau extrait. A l'heure actuelle, le silicium de haute pureté coûte 380 dollars la livre. La couche supérieure de silicium du type *p*, qui a une épaisseur de 0,000 1 pouce (0,0025 mm), est préparée en trempant le silicium dans de la vapeur de trichlorure de bore dans l'azote, pendant une demi-heure, à une température de 1 100 °C. La lumière solaire traverse la couche supérieure de type *p* et pénètre au point de contact. Sous ce point, se trouve le silicium de type *n* contenant de l'arsenic.

Le voltage du circuit ouvert des semi-conducteurs *p-n* est de 0,5 volt, celui du circuit fermé étant de 0,3 volt. Dans ces conditions le courant est d'environ 25 milliampères par cm^2. La batterie solaire est coûteuse, par suite du prix élevé du silicium purifié, du coût du procédé de fabrication, du prix des connexions et du montage. Il est certain que des recherches ultérieures permettront de diminuer ces prix.

Dans toutes les installations utilisant l'énergie solaire, la grande difficulté consiste dans la nécessité de stocker l'électricité pour les périodes où le soleil ne brille pas. Bien que le toit d'une maison de 100 m^2 de surface puisse, en principe, produire 10 kilowatts, lorsque le soleil brille largement, le prix serait absolument prohibitif avec les batteries-accumulateurs actuelles et les investissements impossibles du point de vue économique. Il faudrait faire porter les recherches sur la construction de nouveaux types de batteries, la réduction du prix de revient de la batterie solaire au silicium et la création de cellules photovoltaïques nouvelles et meilleur marché où les électrons et les vides positifs seraient très mobiles.

SOURCES D'ÉNERGIE AUTRES QUE L'ÉNERGIE SOLAIRE

Les meilleures sources non classiques d'énergie sont l'énergie solaire, dans ses formes variées, et l'énergie atomique provenant de l'uranium, du thorium et, probablement beaucoup plus tard, des réactions nucléaires de l'hydrogène et autres éléments. Il est en outre possible d'utiliser l'énergie lunaire et les différences dans les températures de la terre. Ces sources semblent être de moindre importance.

Les marées sont créées par le mouvement de la lune; le long des côtes, il est possible de retenir les eaux de la mer par des barrages, au moment de la marée haute, et de la laisser s'écouler, à marée basse, sur une turbine hydraulique, produisant un travail mécanique ou actionnant une dynamo. La hauteur de la marée varie beaucoup suivant les régions du globe, mais atteint un niveau élevé le long des côtes nord-est de l'Amérique du Nord. En Nouvelle-Angleterre, on a parfois utilisé de petites machines marémotrices pour scier du bois et effectuer d'autres travaux similaires. Il y a vingt ans, sur la côte du Maine, le gouvernement, dans le cadre d'un projet d'énergie électrique, avait entrepris la construction d'un barrage pour retenir l'eau quand la marée baissait. Il a été abandonné avant achèvement.

On peut utiliser la chaleur des volcans pour produire de la vapeur et faire fonctionner un moteur et une dynamo. En fait, dans une région volcanique de l'Italie, on produit de l'énergie électrique de cette manière, en utilisant de la vapeur naturelle. Il n'est pas toujours possible de se servir de la chaleur des volcans. Elle n'est pas permanente partout, et, dans certaines régions, elle peut s'accompagner d'éruptions violentes.

La température s'élève de 1 °C tous les trente mètres à l'intérieur de l'écorce terrestre. Un puits de mine de 1 600 mètres de profondeur aurait à sa base une température plus élevée de 29 °C. On pourrait, théoriquement, utiliser cette différence de température pour actionner un couple thermoélectrique constitué de métaux différents; toutefois, le voltage par point de contact est faible et les nombreux kilomètres de fil nécessaires pour construire une pile thermoélectrique à points de contact multiples provoqueraient une résistance électrique considérable et le prix en serait beaucoup trop élevé. On pourrait aussi utiliser la différence de température pour actionner une machine à vapeur, mais la longueur de tuyau entre les extrémités chaude et froide serait beaucoup trop grande.

Claude a effectué un essai au large de la côte de Cuba, où existe, entre la surface et le fond de l'océan, une grande différence de température qu'il voulait utiliser pour actionner une machine à vapeur; un ouragan a détruit l'installation. Un nouvel intérêt s'est attaché à ce mode de production d'énergie, lors de la conférence sur l'énergie solaire et l'énergie éolienne qui s'est tenue à la Nouvelle-Delhi, en octobre 1954.

CONCLUSIONS

Les combustibles, l'eau, l'atome et le soleil sont nos principales sources d'énergie. Les deux dernières prendront rapidement de l'importance, d'abord dans les pays non industrialisés, puis dans les autres lorsque les combustibles commenceront à s'épuiser. L'énergie atomique exigera de vastes et coûteuses installations. L'énergie solaire pourra se contenter d'installations modestes et d'un prix de revient peu élevé dans les régions rurales, mais de longues recherches seront nécessaires pour augmenter leur rendement et les rendre économiquement rentables. On espère que les travaux de savants et d'ingénieurs, dans le monde entier, permettront de découvrir de nouveaux moyens d'utiliser l'énergie solaire. Peut-être pourra-t-on, non seulement assurer ainsi pour l'avenir une source d'énergie permanente, mais améliorer le niveau actuel de vie matérielle et atténuer par là-même les tensions politiques que peut provoquer la répartition inégale des sources de charbon et de pétrole.

BIBLIOGRAPHIE

1. *Solar Energy Research*, 1955, Édité par Daniels, Farrington et Duffie, J. A., University of Wisconsin Press, Madison, Wisconsin.
2. Farber J., *Utilization of Solar Energy for the Attainment of High Temperatures*, 1955, Référence 1, p. 157-162.
3. Conn W. M., *Solar Furnaces for Attaining High Temperatures*, 1955, Référence 1, p. 163-167.
4. Trombe Félix, *Development of Large Scale Solar Furnaces*, 1955, Référence 1, p. 169-171.
5. Löf G. O. G., *House Heating and Cooling with Solar Energy*, 1955, Référence 1, p. 33-36.
6. Hottel H. C., *Power Generation with Solar Energy*, 1955, Référence 1, p. 85-90; *Performance of Flat Plate Solar Heat Collectors*, Trans. Am. Soc. Mech. Eng., 1942, *64*, 91.
7. Telkes M., *Solar Thermoelectric Generators*, 1955, Référence 1, p. 137-142.
8. Heywood H., *Solar Energy Applications*, 1955, Référence 1, p. 227-230; *Solar Energy : Past, Present and Future Applications*, 1953, Engineering, *176*, 377, 409.
9. Anderson L. B., Hottel H. C. et Whillier A., *Solar Heating Design Problems*, 1955, Référence 1, p. 52-56.
10. Löf G. O. G., *House Heating and Cooling with Solar Energy*, 1955, Référence 1, p. 33-43.
11. Telkes M., *Solar Heat Storage*, 1955, Référence 1, p. 57-60.
12. Abbot C. G., *Solar Power from Collecting Mirrors*, 1955, Référence 1, p. 91-95.

12*a*. Putnam P., *The Possibilities of Solar Energy*, Report by the President's Materials Policy Commission IV U. S. Superintendent of Documents, 1952, Washington, D. C.

13. Telkes M., *Solar House Heating a Problem of Heat Storage*, Heating and Ventilating, 1947, *44*, 68; *A Low Cost Solar Heated House*, Heating and Ventilating, 1950, *47*, 72.
14. Hottel H. C. *et al.*, *Space Heating with Solar Energy*, Édité par R. W. Hamilton, Comptes rendus d'une conférence ayant eu lieu en 1950 au Massachusetts Institute of Technology.
15. Heidt L. J. et McMillan A. F., *Conversion of Sunlight into Chemical Storage for Man's Use*, Science, 1953, *117*, 75.
16. Yuan E. L. et Daniels F., *Energy Efficiency of Photosynthesis by Chlorella*, Biochemica et Biophysica Acts, 1955.
17. Fisher A. W., Jr., *Economic Aspects of Algae as Potential Fuel*, 1955, Référence 1, p. 185-189.
18. Burlew J. S., *Algal Culture from Laboratory to Pilot Plant*, Carnegie Institution de Washington.
19. Rabinowitch Eugène, *Photochemical Utilization of Light Energy*, 1955, Référence 1, p. 193-202.
20. Trivich D., Flinn P. A. et Bowlden G. L., *Photovoltaïc Cells in Solar Energy Conversion*, 1955, Référence 1, p. 149-154.
21. Chapin D. M., Fuller C. S. et Pearson G. L., *A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power*, Journal of Applied Physics, 1954, *25*, 676.

L'énergie nucléaire dans le bilan énergétique mondial futur

Département des affaires économiques et sociales, Organisation des Nations Unies

INTRODUCTION *

L'ordre du jour établi pour la Conférence internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques prévoyait qu'un résumé serait établi des informations fournies au Secrétariat par les différents pays sur leurs ressources et leurs besoins en énergie électrique et thermique pour les cinquante années à venir. Le but d'un tel résumé devait être de faire apparaître la nécessité d'une nouvelle source d'énergie, en l'occurrence l'énergie nucléaire, et d'établir une classification basée sur le degré de cette nécessité. Il était enfin suggéré de souligner l'importance relative de l'énergie nucléaire pour les pays non industrialisés, pour ceux qui se trouvent dans une phase de transition entre l'économie agricole et l'économie industrielle, et pour les pays enfin déjà industrialisés.

Vingt-deux pays ** ont répondu à cette enquête mais, étant donné qu'aucun questionnaire précis ne leur avait été soumis, les renseignements qui sont parvenus au Secrétariat sont fragmentaires et hétérogènes. Certains pays ont surtout mis l'accent sur l'estimation de leurs besoins, pour des périodes futures d'ailleurs variables; d'autres qui n'ont pas voulu se hasarder à de telles prévisions se sont contentés de brosser un tableau de leurs ressources classiques. A l'exclusion du domaine thermique, c'est surtout le domaine énergétique, enfin, et plus particulièrement celui plus précis de l'énergie électrique, qui a été mentionné par la plupart d'entre eux. Afin de donner une vue d'ensemble du problème, nous avons donc été amenés à compléter ces renseignements en recourant à d'autres sources d'informations.***

La classification des pays selon leur degré d'industrialisation, afin de servir de base à une détermination de l'importance économique de l'énergie nucléaire, s'est révélée arbitraire. Tel pays où la consommation en énergie électrique par habitant était en 1954 la plus forte du monde (6 450 kWh) dispose encore de ressources naturelles dont l'équipement lui semble se révéler plus avantageux, pour longtemps encore, que celui de centrales nucléaires. Certaines régions de tel autre pays, dont la consommation spécifique moyenne annuelle est de 20 kWh seulement, ne disposent déjà plus de ressources naturelles conventionnelles suffisantes. D'ailleurs, quel que soit le degré d'industrialisation du pays, si elle est fournie à un prix jugé compétitif, l'énergie nucléaire peut constituer pour tous la base d'un essor nouveau. C'est la raison pour laquelle nous avons été amenés à adopter, comme on le verra par la suite, une classification différente de celle initialement prévue.

La nécessité relative, durant les cinquante années à venir, de l'intégration de l'énergie nucléaire dans le système énergétique mondial repose tout d'abord sur un *bilan* quantitatif et qualitatif de l'estimation des besoins et de l'importance des ressources connues susceptibles de les satisfaire. Elle dépend, par ailleurs, de la compétition entre les *prix* de revient respectifs des moyens de production disponibles.

Nous examinerons successivement ces deux éléments dans les deux parties de ce document.

Nous tenons à souligner que de telles prévisions effectuées à cinquante années de distance reposent nécessairement sur des hypothèses fragiles. Nous avons donc été guidés par le désir de dégager des tendances plus que par celui de présenter un tableau précis de la situation future.

Étant donné surtout la diversité des conditions économiques des différents pays, de telles prévisions nécessiteraient des études plus approfondies sur une base nationale ou même, le plus souvent, sur une base régionale, études que le très court laps de temps dont nous avons disposé ne nous a pas permis d'entreprendre. Il ne s'agit donc là que d'une première esquisse qui mériterait d'ailleurs d'être retouchée périodiquement, ne serait-ce que pour tenir compte du développement d'autres ressources non classiques telles que l'énergie solaire qui peuvent, à brève échéance, indépendamment de l'énergie nucléaire, modifier l'équilibre énergétique de certains pays.

---

* Dans la présente étude, les symboles suivants ont été utilisés :

... = chiffre non disponible;
— = zéro ou quantité négligeable.

** A la date du 24 juillet 1955, les pays suivants avaient fait parvenir au Secrétariat de la Conférence : *a*) le texte complet de leurs réponses : Birmanie, Canada, États-Unis d'Amérique, Royaume-Uni, Yougoslavie; *b*) le sommaire seulement : Argentine, Australie, Belgique, Brésil, Chine, Danemark, Inde, Israël, Italie, Japon, Norvège, Pays-Bas, Philippines, Suède, Tchécoslovaquie, Thaïlande.

*** Dans les tableaux qui suivent, une distinction sera faite entre les renseignements fournis par les différents pays en réponse à cette enquête et ceux qui proviennent d'autres sources.

PREMIÈRE PARTIE

BILAN DES RESSOURCES ET DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES

Chapitre premier

Éléments d'un tel bilan

A. Les besoins

La détermination des besoins en énergie a été effectuée pour l'année 1952 dans un mémoire préparé par l'ONU. [1] * Le tableau 1 en reproduit les chiffres essentiels. Il souligne l'inégale répartition de ces besoins dans les différents pays.

B. Les ressources énergétiques classiques

Le tableau 2 donne pour l'ensemble des pays du monde les estimations actuelles de leurs ressources en charbon, lignite, pétrole, gaz naturel, ainsi que de leurs ressources hydrauliques (voir le détail par pays à l'annexe I). Elles ont été exprimées en kilowattheures ** afin de faciliter une comparaison ultérieure avec les besoins. (Pour tenir compte de la différence entre les ressources minérales épuisables et les ressources hydrauliques, on a multiplié ces dernières par 1 000 avant de les inclure dans le total.) ***

La figure 1 fait apparaître l'inégale localisation de ces ressources à la surface du globe. Certains pays n'en possèdent aucune, d'autres ne possèdent que de l'énergie hydraulique à l'exclusion de toutes autres sources d'énergie. Enfin le potentiel hydraulique d'autres pays est inexistant.

Chapitre II

Considérations générales

« Il n'y a de certitude que du présent et celle-ci se diffracte à mesure que l'on cherche à en suivre les répercussions dans l'avenir. » [2]. Ceci est d'autant plus vrai lorsqu'il s'agit de bilan énergétique, dont les composantes très diverses rendent déjà difficile l'évaluation dans le présent, et de prévisions pour une période aussi longue que celle de cinquante années prévue pour cette conférence.

C'est pourquoi, avant que de tenter un tel bilan, il est utile d'analyser les facteurs dont il dépend.

A. Estimation des besoins

L'estimation des besoins énergétiques sur le plan mondial a fait l'objet de documents qui ont été soumis à cette même session [1, 3]. Elle conduit à la détermination de taux moyens annuels d'augmentation qui semblent osciller entre 2 et 3,5 pour cent. Nous ne reviendrons pas sur cette question. Mais aussi paradoxal que cela puisse paraître, une telle estimation effectuée sur le plan mondial comporte relativement moins d'aléas car elle permet le jeu de la loi des grands nombres.

Par contre, si l'on veut dresser un bilan par pays, c'est évidemment sur cette base nationale et bien souvent même sur la base plus restreinte des régions qui composent ces pays, que toute estimation doit être établie. L'application d'un taux moyen uniforme ne peut être employée qu'à titre d'hypothèse en l'absence d'analyse plus approfondie.

Les *méthodes* qui sont employées dans une telle estimation peuvent se décomposer en deux catégories :

a) Les premières sont basées sur l'application d'un taux moyen, la loi qui fixe ce taux pouvant avoir des origines diverses. Certaines s'expriment au moyen de formules mathématiques plus ou moins complexes. D'autres se déduisent de la relation existant entre la consommation d'une part et la démographie et l'activité économique du pays considéré d'autre part. Le plus souvent, elles reflètent la seule extrapolation des besoins constatés durant les années passées.

b) Les secondes consistent à sommer les résultats fournis par un examen détaillé des différents secteurs qui composent la consommation. (Il faut mentionner également la méthode dite *input-output*, principalement employée aux États-Unis.)

Si l'application d'un taux moyen semble constituer la méthode la plus répandue, il faut reconnaître que dans la pratique chaque pays utilise concurremment plusieurs méthodes, les résultats de l'une corrigeant ceux de l'autre.

L'emploi préférentiel d'une méthode déterminée dépend des facteurs suivants : *a*) le degré de la planification de l'économie; *b*) la durée sur laquelle s'étend la prévision; *c*) le degré d'industrialisation; *d*) la structure enfin des ressources énergétiques.

Mais bien que ces méthodes aient fait depuis longtemps l'objet d'études détaillées, principalement dans le domaine de l'énergie électrique, il semble bien que l'incertitude des résultats auxquels elles conduisent doive rester aussi grande et qu'il y ait un certain nombre d'aléas qu'aucune formule n'est capable de prévoir. D'ailleurs l'accélération des évolutions industrielles qui suit celle des progrès

---

* Les numéros entre crochets renvoient à la bibliographie qui figure à la fin du mémoire.

** La valeur du mégawattheure exprimée en d'autres unités électriques ou en d'autres systèmes de mesure d'énergie est la suivante :

1 mégawattheure = 1 000 kilowattheures (kWh);
» = 1 000 000 de wattheures;
» = 860 000 kilocalories (kcal);
» = 3 412 000 British thermal units (Btu).

Équivalent électricité (de la valeur énergétique théorique totale en kilowattheures par unité indiquée) :

Houille	8,0	par kilogramme;
Brown coal et lignite	2,5	» »
Gaz naturel	10,6	par mètre cube;
Pétrole	12,0	par kilogramme.

*** Ce calcul a été effectué afin de permettre une estimation des ressources en énergie par habitant et de souligner leur inégale densité. Aucune conclusion n'en a été tirée dans le cours de ce document.

Tableau 1

Consommation apparente brute des sources commerciales et non commerciales d'énergie, 1952

(En équivalent électricité du pouvoir calorifique total, en milliards de kWh)

Pays	Combustibles solides[a]	Combustibles liquides[b]	Gaz naturel[c]	Énergie hydro-électrique[d]	Total sources commerciales	Sources non commerciales[e]	Total toutes sources	Par habitant (MWh)
Afrique	265,1	112,1	0,1	1,7	379,0	386,9	765,9	3,7
Amérique du Nord	3 562,2	3 824,3	2 516,6	172,3	10 075,3	364,8	10 440,0	60,8
» centrale	12,0	194,6	27,0	3,9	237,5	128,2	365,7	6,9
» du Sud	72,2	273,0	28,1	13,1	386,4	318,4	704,8	6,1
Asie[f]	745,4	251,9	14,0	46,1	1 057,3	1 457,2	2 514,6	3,1
(Chine continentale)	...	...	...	...	...	...	(1 400)	(3,0)
Europe[g]	4 262,0	671,9	22,7	136,4	5 093,0	395,4	5 488,4	18,1
(Europe orientale)	...	...	...	...	...	...	(1 461,0)	(16)
(U.R.S.S.)	...	...	...	19,0	...	...	(3 500,0)	(16)
Océanie	180,2	88,8	—	5,1	274,2	39,4	313,5	24,4

[a] Quantité extraite et produit des charbons et de lignite, plus quantité nette de briquettes et de coke.
[b] Essence, pétrole lampant, fuel-oil et gaz de pétrole liquéfié.
[c] Gaz naturel et gaz de raffinerie, plus importations nettes de gaz manufacturé.
[d] Y compris les importations nettes d'électricité.
[e] Bois de chauffage, bois à gazogène, déchets de scieries, bagasse et autres combustibles végétaux.
[f] Non compris la Chine (continentale), la Corée du Nord et l'U.R.S.S.
[g] Non compris l'Europe orientale et l'U.R.S.S.

techniques tend à diminuer la durée pour laquelle l'on peut formuler des prévisions valables et, au-delà d'une certaine période qui tend donc à se raccourcir, les estimations appartiennent « au domaine où la science et l'art se rencontrent » [4].

La seule conclusion à laquelle l'application de ces méthodes permet d'arriver est peut-être que l'on ne peut nulle part encore déceler de signes de saturation dans la consommation en énergie, et ce point a été à nouveau souligné dans la plupart des réponses qui nous sont parvenues.

La variété dans l'estimation des taux d'accroissement de la consommation énergétique tient principalement aux trois facteurs suivants.

Tableau 2

Bilan global des réserves de charbon, lignite, pétrole, gaz naturel et énergie hydroélectrique et réserves d'énergie de tout ordre par habitant[a]

(Équivalent électricité du pouvoir calorifique total)

Pays	Total combustibles solides, charbon et lignite	Réserves prouvées de pétrole	Réserves de gaz naturel dans les gisements en exploitation	Énergie hydroélectrique	Énergie totale	
	10^9 kWh	10^9 kWh	10^9 kWh	10^9 kWh par an	10^9 kWh	Par habitant 10^3 kWh
Afrique	614 345	243	—	1 531	2 145 636	10 159
Amérique du Nord	12 406 064	50 642	66 157	442	13 120 862	75 140
» centrale	26 098	2 832	354	95	124 284	2 255
» du Sud	139 800	18 610	199	368	526 619	4 459
Asie	3 191 426	131 892	849	1 228	4 552 167	3 171
Europe	5 106 831	2 070	3 482	574	5 711 019	14 231
U.R.S.S.	10 447 732	16 284	10 261	464	11 045 677	53 358
Océanie	240 002	155	—	47	287 372	20 976
TOTAL MONDIAL	32 172 298	222 738	81 302	4 749	37 513 635	14 337

[a] Voir annexe I.

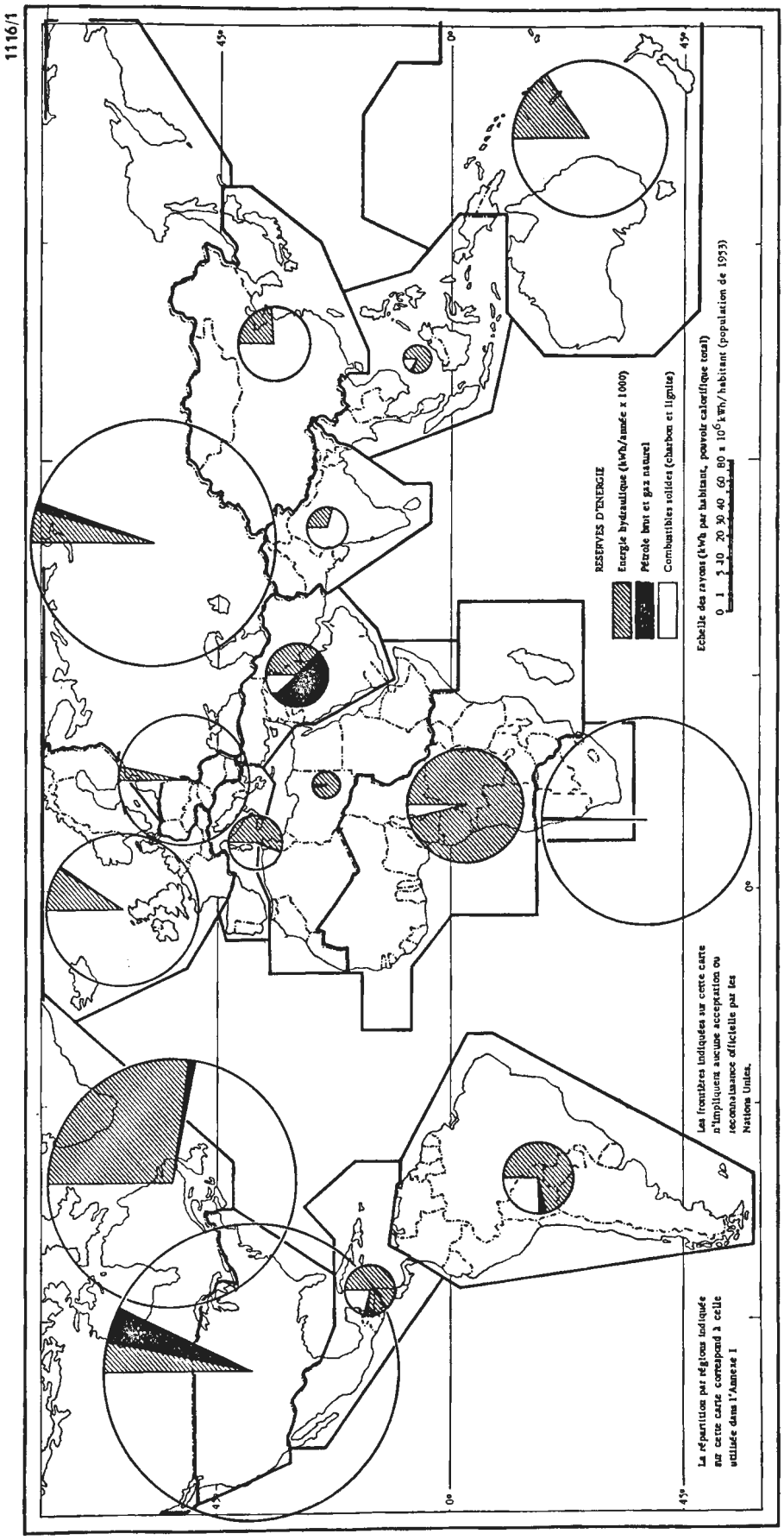


Figure 1. — Répartition mondiale des réserves commerciales en sources d'énergie.

a) *Démographie.* — Le taux moyen annuel d'accroissement de la population mondiale, pour les cinquante années à venir, est évalué selon les auteurs de 0,6 pour cent [3] à 1,5 pour cent [1]. Les prévisions données par les différents pays accusent une diversité assez sensible.

Tableau 3

Prévisions du taux d'accroissement de la population dans certains pays[a]

Pays	Taux (en pour cent)	Période considérée
Belgique	0,39	1955-2000
Japon	0,43	1954-2000
Suisse	0,49	1951-2000
Finlande	0,9	...
Hollande	0,96	1950-1975
Yougoslavie	1,34	1955-2000
Australie	2,6	...
Israël	3,9	1954-1965

[a] Chiffres tirés des réponses parvenues au Secrétariat.

b) *Activité économique.* — Il n'est pas besoin de donner de chiffres pour rappeler la diversité des activités économiques des différents pays. Lorsqu'il s'agit en outre de prévoir l'évolution de cette activité, l'on doit également, surtout s'il s'agit de prévisions à court terme, tenir compte de la conjoncture économique *. (Voir cependant l'annexe II.)

c) *Rendement.* — Une faible partie seulement de la production d'énergie brute est finalement utilisée. Le rendement moyen de la transformation de cette énergie brute en énergie utile est passé pour le monde de 11 à 22 pour cent entre 1900 et 1950. Son évolution a été différente selon les pays. Dans ce même temps, en effet, il est passé de 11 à 30 pour cent pour les États-Unis, de 40 à 58 pour cent pour la Suisse **, alors qu'il n'était en 1950 que de 13 pour cent au Japon et de 6 pour cent aux Indes [5].

Mais ce rendement est finalement limité et la consommation d'énergie brute qui s'était accrue lentement durant ces dernières années risque donc, surtout dans les pays industrialisés, de suivre désormais de plus près l'évolution de la consommation d'énergie utile. C'est ce que souligne la Belgique; son rendement actuel est de 34 pour cent et elle prévoit qu'il pourra s'élever seulement à 37 pour cent en 1980 et à 38 ou 39 pour cent en l'an 2000 [6]. Cela constitue d'ailleurs une des raisons pour lesquelles l'inégale localisation des consommations d'énergie brute, qui a été mise en évidence dans le chapitre premier, ne s'atténuera probablement guère durant la période de cinquante années à venir.

Il est intéressant à ce sujet de constater comment le pourcentage de ces consommations a évolué entre les différents continents dans le passé.

Tableau 4

Densité relative des consommations en énergie dans le monde

Pays	Pourcentage du total		Taux annuel moyen d'accroissement de la consommation en énergie par habitant (1938-1952)
	1938	1952	
Afrique	0,9	1,1	2,48
Amérique du Nord	39,2	44,2	2,85
Amérique latine	4,6	7,1	2,85
Asie	9,2	10,7	3,64
Europe	35,4	24,5	0,57
Océanie	0,9	0,9	2,47
U.R.S.S.	9,8	11,5	3,27
	100	100	

Ces différences dans les estimations des besoins en énergie se trouvent soulignées par les taux indiqués dans les réponses parvenues au Secrétariat et que l'on trouvera dans le tableau 5.

Tableau 5

Taux moyen annuel d'accroissement prévu pour la consommation en énergie

(En pour cent)

Pays	Énergie totale	Énergie électrique	Période considérée
Autriche	2,5	5,3	1950-1980
Belgique	1,7	5,3	1955-1980
Birmanie	...	11,0	1957-2005
Canada	...	5,5	1955-1960
	...	5,0	1960-1965
	...	4,5	1965-1975
Chine	...	10,5	1955-2000
	...	6,0	1965-2000
Danemark	2,5	7,5	1955-1975
	1,8	3,5	1975-2000
	(2,0)	(5,0)	(1955-2000)
Égypte	...	16,5	1955-1965
	...	4,2	1965-1975

* Les estimations faites par la Suisse pour une période d'ailleurs relativement courte de 5 ans considèrent trois cas : période de crise, situation économique normale et période de haute conjoncture. Elles donnent pour ces trois cas des chiffres qui sont respectivement dans le rapport de 1 à 1,3 et 1,6.

** Le taux élevé du rendement pour la Suisse est dû à l'emploi très répandu de l'énergie électrique dans tous les secteurs, en particulier dans celui de la traction. (Vue d'ensemble de la consommation d'énergie en Suisse à l'heure actuelle et estimation de la demande future. Comité de l'énergie du Comité national suisse de la Conférence mondiale de l'énergie, 1954.)

Tableau 5 *(fin)*

Pays	Énergie totale	Énergie électrique	Période considérée
Finlande	...	11,0	1954-1960
	...	8,0	1960-1970
Israël	10,0	14,5	1954-1965
Italie	...	7,0	1955-1960
	...	6,0	1960-1975
Nouvelle-Zélande . .	...	7,6	1955-1965
	...	6,0	1965-1975
Pay-Bas	2,0	...	1954-1975
	1,7	...	1954-2000
République fédérale d'Allemagne . . .	1,7	...	1954-1970
Royaume-Uni . . .	2,0 [a]	...	1954-1975
Suède	...	6,5	1954-2000
Suisse	1,4	3,6	1951-1975
	1,3	2,0	1951-2000
Thaïlande	...	8,7 [b]	1965-1975
	...	7,5 [b]	1975-1995
Yougoslavie	...	12,0	1954-1960
	...	7,0	1960-1975
	...	6,0	1975-2000
	3,6	...	1954-2000

[a] Chiffre probable; limite maximum possible : 2,8.
[b] Pour l'industrie seulement.

B. Estimation des ressources

L'estimation des ressources en énergie ainsi que leur utilisation respective probable dans l'avenir présentent également de grandes incertitudes.

a) *Ressources épuisables*

1. *Combustibles solides*

Comme le montre le tableau 2, les combustibles solides représentent la quasi-totalité des ressources minérales. Si l'on comparait l'importance de leurs réserves à l'utilisation qui en est faite actuellement, il apparaîtrait qu'elles seraient suffisantes pour la satisfaire encore pendant de très nombreuses années. C'est ce que ferait apparaître par exemple un bilan effectué à l'échelle mondiale (tableau 6).

Tableau 6

Combustibles	Réserves exprimées en 10^{15} kWh	Durée des réserves basée sur la consommation de 1952 (en années)
Combustibles solides .	32,172	2 500
Pétrole (réserves prouvées)	0,223	32
Gaz naturel	0,081	30
	32,476	1 400

Mais les quantités de charbon que l'on peut extraire chaque année sont finalement limitées. Le progrès qui s'accomplit en effet dans les méthodes extractives est le plus souvent compensé par le double fait que les couches deviennent de plus en plus profondes et que la main-d'œuvre disponible pour les mines a tendance à se raréfier. C'est ainsi qu'au Royaume-Uni, la profondeur moyenne des couches, qui atteignait 330 mètres en 1924 atteint actuellement 400 mètres. Les récentes exploitations de mines qui ont été autorisées depuis 1947 ont une profondeur allant de 550 à 900 mètres. Cette augmentation progressive de la profondeur s'accompagne également d'une augmentation de la température et provoque le plus souvent des difficultés de ventilation. Par ailleurs, l'éventail des qualités de charbon exigées par la demande est assez large, et cela conduit certains pays, dont les réserves sont pourtant importantes, à importer du charbon de qualité particulière ou à opérer une substitution avec d'autres sources d'énergie.

Ces phénomènes ont été mis en évidence dans les réponses de certains pays. C'est ainsi que la Grande-Bretagne souligne « la constance remarquable de l'augmentation, de 1,2 pour cent par an (au taux exponentiel) — ce qui correspond à un doublement tous les soixante ans — du prix du charbon par rapport au niveau général des prix de gros ».

La limite de l'extraction annuelle possible ressort du tableau 7.

Tableau 7

Limites probables de l'extraction annuelle de charbon

Pays	Ressources en charbon (en 10^6 tonnes métriques)	Maximum de l'extraction possible par an (en 10^6 tonnes métriques)	Durée des réserves sous l'extraction maximum annuelle (en années)
Belgique	11 000	35	310
Japon	18 600	55	340
Grande-Bretagne .	172 000	260	660
France	12 000	55	220

[a] Cette limitation conduit par exemple la France à importer dès maintenant chaque année environ 15×10^6 tonnes de charbon afin de satisfaire à ses besoins.

2. *Pétrole*

L'incertitude qui règne sur les réserves mondiales de pétrole est considérable. L'estimation des réserves probables est d'environ 5 fois celle des réserves prouvées. Étant donné que le pétrole est le plus souvent consommé loin des centres de production, la production annuelle n'est en fait limitée que par la capacité des moyens de transport.

3. *Gaz naturel*

Il en est de même du gaz naturel. Les résultats récents des sondages effectués dans certains pays comme l'Italie et la France par exemple le prouvent amplement.

b) *Ressources inépuisables*

L'évaluation précise des ressources hydrauliques est malaisée. Seules en effet peuvent être déterminées avec une certaine exactitude leurs limites supérieures théoriques. Une telle détermination a fait l'objet d'études récentes basées sur une méthode uniforme, ce qui permet d'obtenir des chiffres comparables entre eux [7].

Mais c'est la connaissance des ressources qu'il est techniquement et surtout économiquement possible d'exploiter qui s'avère la plus délicate. L'on s'est souvent efforcé de déterminer un rapport entre les différents potentiels. D'après l'étude précitée, les potentiels techniques et économiques représentent respectivement environ les 30 et 20 pour cent du potentiel théorique. De tels rapports cependant ne donnent qu'un ordre de grandeur, la détermination du potentiel économique dépendant, selon les pays, du nombre d'avant-projets qui ont été étudiés, du progrès de la technique, du degré d'équipement déjà réalisé, des besoins de la consommation et de la présence enfin d'autres sources concurrentes d'énergie. Une telle notion mérite donc d'être précisée périodiquement. L'on ne citera que l'exemple de la Suède où les calculs nationaux donnaient, en 1923, un potentiel de 32 milliards de kilowattheures; ce chiffre était porté à 40 milliards de kilowattheures en 1938 et il est actuellement estimé à 80 milliards de kilowattheures.

L'aménagement annuel de ce potentiel hydraulique est également limité principalement par l'importance des capitaux et la grande durée des travaux que nécessite la construction de toute centrale hydroélectrique.

C. Manque de corrélation entre l'inégale localisation des ressources et l'inégale localisation des besoins

Les ressources et les besoins énergétiques sont non seulement répartis inégalement à la surface du globe mais il n'existe que peu de corrélation entre leur localisation. L'Afrique par exemple possède 30 pour cent des ressources hydroélectriques mondiales, alors que sa consommation en énergie hydroélectrique ne représentait en 1952 que 0,4 pour cent de celle du monde. L'Asie possède environ 50 pour cent des réserves de pétrole et sa consommation propre n'atteignait en 1952 que les 4,5 pour cent de la consommation mondiale.

Il semblerait *a priori* que le transport de l'énergie ainsi qu'une certaine substitution d'une forme d'énergie à une autre pourraient atténuer ces différences et conduire à un meilleur équilibre. Or, l'importance de ces deux facteurs est relativement faible.

a) *Transport de l'énergie*

Le pourcentage de l'énergie transportée par rapport à la production totale est peu élevé.

En ce qui concerne le charbon, 10 pour cent seulement de la production sont exportés hors des pays d'origine. Si l'on ne considère que les mouvements entre continents, le total des importations nettes ne représentait en 1952 que 2,3 pour cent de la production mondiale. Le transport du pétrole brut est relativement plus important puisque le volume exporté représentait en 1952 les 30 pour cent de la production totale, mais celle-ci n'intervenait cependant que pour 28 pour cent dans la production de l'ensemble des sources commerciales d'énergie. Il en est de même pour le gaz. Quant à l'énergie électrique, non seulement elle ne franchit pas actuellement les frontières des continents, mais à l'intérieur même de ceux-ci, les mouvements sont très faibles. Le pourcentage en Europe de l'énergie exportée hors des pays d'origine a varié de 1,3 à 1,5 pour cent entre 1937 et 1953. Une analyse plus détaillée de la situation montrerait qu'il y a finalement très peu de pays de quelque importance dont la balance entre les importations et les exportations d'énergie représente une part importante de leur production.

Les raisons de cette situation peuvent être groupées en trois catégories :

1. *Contingences dues au transport*

— Étant donné l'importance de la distance sur laquelle certaines formes d'énergie doivent être transportées, on se heurte tout d'abord à des difficultés et parfois même à des impossibilités d'ordre technique. La conception actuelle des câbles sous-marins par exemple ne permet à l'énergie électrique de franchir les mers que sur une distance de 100 km environ. Celle des réseaux aériens de transport à très haute tension (400 kV) la limite à 1 000 ou 1 200 km.

Cette limitation provoque d'ailleurs une certaine concurrence quant à la forme sous laquelle l'énergie est transportée. Lorsque le transport par voie maritime se révèle difficile, l'énergie électrique peut être transportée de façon indirecte sous forme de produits finis (tels que l'aluminium), dont la fabrication nécessite une grande quantité d'énergie électrique. Le transport aérien à longue distance ne se conçoit que pour l'énergie hydroélectrique, le prix de celui de l'énergie thermique étant rapidement concurrencé par le prix du transport du charbon, au fur et à mesure surtout que le pouvoir calorifique de ce dernier augmente. De telles difficultés ne se rencontrent pas dans le cas du pétrole et du gaz naturel, dont le transport s'effectue aisément sur de très grandes distances, soit par pipe-lines soit par voie maritime.

— Le transport de l'énergie nécessite surtout des installations spécifiques dont le coût est très élevé. Pour l'énergie électrique, étant donné le coût de construction des lignes et les pertes qui accompagnent son transport (pertes en ligne, dans les transformateurs, et pertes dues aux moyens de compensation nécessaires à la stabilité et à la régulation du réseau), le coût du transport de 150 000 kW sur 400 km par exemple est sensiblement égal à la moitié de celui nécessité par la construction d'une centrale thermique de même puissance. Pour le

charbon, le transport intervient en moyenne pour 12 pour cent dans le prix de vente au consommateur. La part des frais de transport par mer représente environ 25 pour cent du prix du pétrole raffiné (compté au départ de la raffinerie) extrait du pétrole brut du Moyen-Orient [8].

— Enfin, le coût du transport du gaz naturel par pipe-line est approximativement deux fois plus élevé que celui du pétrole, si on les ramène tous deux à la calorie, mais on obtiendrait un prix sensiblement inférieur dans le cas d'un transport de gaz sous forme liquide. L'importance des investissements nécessités par les moyens de transport, exige en outre que les sources d'énergie à transporter soient assez abondantes pour permettre un amortissement rationnel des capitaux engagés. La limitation relative du nombre de régions possédant un tel potentiel est un des éléments qui limite le transport lui-même.

2. *Utilisation de l'énergie*

Alors que la production du charbon, du gaz naturel et du pétrole est sensiblement régulière, leur utilisation ne l'est pas dans la même mesure et dépend partiellement des saisons. Or, le stockage de ces produits, qui d'ailleurs entraîne des frais supplémentaires, est le plus souvent difficile. Quant à l'énergie électrique, elle n'est stockable que sous forme de charbon dans les parcs des centrales thermiques ou sous la forme d'eau accumulée dans les réservoirs. Par contre, les variations de la consommation sont très grandes, non seulement à l'échelle des saisons mais aussi à l'intérieur d'une même journée. (En Europe, en 1953, la capacité de stockage des réservoirs atteignait 10 pour cent environ de la production hydroélectrique; or, durant le troisième mercredi de décembre de cette année, le rapport de la puissance de pointe à la puissance de nuit était de 2.)

3. *Les frontières politiques*

Les mouvements d'énergie créent une certaine dépendance entre pays importateurs et pays exportateurs. Les premiers ont donc tendance à exploiter au maximum leurs propres ressources avant de faire appel à l'extérieur. Les besoins en énergie pouvant s'adapter dans une certaine mesure assez facilement aux ressources, il en résulte parfois une certaine distorsion dans l'utilisation de ces dernières. La tendance actuelle, cependant, consiste à assouplir les barrières administratives et douanières qui risqueraient de s'opposer à de tels mouvements, tout en tenant compte de l'évolution des besoins locaux. (L'Europe occidentale importait en 1929 35 pour cent du pétrole brut disponible dans le monde et 94 pour cent en 1953. Dans le même temps, ses importations de produits raffinés passaient de 60 à 7 pour cent de sa consommation brute.)

On peut se demander si la situation dans ce domaine risque d'évoluer considérablement dans les 50 années à venir.

Dans le domaine de l'énergie électrique, si l'on excepte les câbles sous-marins dont la technique évolue assez lentement, ce n'est pas le manque de capacité qui limite le transport, car rien ne s'oppose à ce que l'on réalise des réseaux à tension encore supérieure, mais bien au contraire les quantités d'énergie à transporter. Le degré d'équipement des sources hydrauliques va en effet s'accroissant, étant donné surtout la cadence à laquelle se développent les besoins.

Parmi les nouvelles sources d'énergie que l'on peut envisager, il en est peu qui se prêtent à de grands transports. L'énergie des marées ne peut être développée que dans un petit nombre d'endroits où l'amplitude de la marée est suffisante. (La réalisation des projets français correspondrait à la moitié seulement de la consommation actuelle de ce pays.)

L'utilisation économique de l'énergie éolienne ne peut guère se concevoir que par l'exploitation d'aéromoteurs de puissance relativement faible, dont la production est par conséquent localisée. On retrouve cette même localisation dans l'énergie thermique des mers, ou dans le développement de la technique de la pluie artificielle. Seul celui de l'énergie solaire est susceptible de modifier la structure énergétique des pays tropicaux.

Par contre, le transport du pétrole et du gaz naturel s'accroîtra dans les années à venir. La limitation apparente des ressources connues ne doit pas faire illusion et les besoins se développent par ailleurs considérablement. La consommation mondiale de pétrole atteint actuellement 29 pour cent de la consommation mondiale d'énergie. Elle a doublé durant ces 20 dernières années et certains pays, comme la Belgique par exemple, indiquent que leur consommation de pétrole augmentera environ de 6 pour cent par an jusqu'en 1980.

Quoi qu'il en soit, il est évident que l'introduction de l'énergie nucléaire modifiera considérablement ces données, les frais de transport du combustible étant dans ce cas négligeables et les centrales pouvant être aisément situées près des centres de consommation.

Tableau 8

Pays	Consommation d'énergie commerciale par rapport à la consommation d'énergie totale[a] (1952) (en pour cent)
Asie	42
Afrique	50
Amérique du Sud	55
Amérique centrale	65
Océanie	88
Europe	93
Amérique du Nord	97
Monde	85

a Chine, Corée du Nord, U.R.S.S. et pays de l'Est de l'Europe exclus.

b) *Substitution d'une forme d'énergie à une autre*

Le tableau 8 montre tout d'abord la proportion d'énergie commerciale consommée dans les différentes partie du monde.

Or, au fur et à mesure que les pays s'industrialisent, on assiste à une substitution de l'utilisation des sources commerciales* aux sources non commerciales** d'énergie. Cela apparaît très nettement dans le tableau 9.

Tableau 9

Consommation mondiale des sources commerciales d'énergie (combustibles solides, pétrole, gaz naturel, énergie hydraulique) par rapport à la consommation totale d'énergie

Année	Consommation relative des sources commerciales (sources non commerciales = 100)	Consommation des sources commerciales en pourcentage de l'utilisation totale d'énergie
1860 . .	37,7	27,4
1870 . .	54,8	35,4
1880 . .	79,4	44,3
1890 . .	114,0	53,3
1900 . .	167,0	62,5
1910 . .	212,2	68,0
1920 . .	267,2	72,7
1930 . .	276,1	73,4
1940 . .	372,9	78,9
1950 . .	395,8	79,8
1953 . .	511,9	83,7

Le tableau 10 donne l'évolution des différentes formes d'énergie consommées dans le monde au cours de ces dernières années.

* Combustibles solides et liquides, gaz naturel, énergie hydraulique.

** Bois de chauffage, bois à gazogène, déchets de scieries, bagasse et autres combustibles végétaux.

Le tableau 11, enfin, donne les taux annuels d'accroissement des consommations par sources d'énergie pour la période récente de 1948 à 1953.

Tableau 11

Taux moyens annuels d'accroissement des consommations en énergie (1948 à 1953)

Charbon	1,0
Lignite	8,4
Pétrole	7,1
Gaz naturel	10,3
Énergie hydraulique	8,6
Énergie totale	4,0
Énergie électrique	3,6

On constate tout d'abord que la consommation de charbon tend à rester stationnaire et qu'en tout cas son importance dans le bilan mondial est en constante diminution; alors qu'en 1860, elle représentait 98 pour cent du bilan mondial, elle n'en représente plus désormais que 51 pour cent. Parallèlement, les consommations de produits pétroliers

Tableau 12

Pourcentage de la production hydroélectrique par rapport à la production totale d'énergie électrique

	1929	1937	1951	1952	1953
Monde	43,5	40,7	35,0	34,6	. . .
Amérique du Nord .	45,8	43,5	32,5	32,5	. . .
Europe	39,9	38,0	38,0	38,0	37,0
Asie	72,4	76,0	71,0	70,0	. . .
Afrique	2,8	7,3	10,0	9,2	. . .
Océanie	27,5	29,8	33,4	33,0	. . .
Autres pays	21,6	23,8	23,8	22,0	. . .
dont : U.R.S.S. .	7,0	12,0	14,0	16,0	17,0[a]

[a] Selon le plan quinquennal, les prévisions pour l'année 1955 donnent pour l'hydraulique un pourcentage de 25 pour cent.

Tableau 10

Consommation mondiale des sources commerciales d'énergie

(En pour cent)

Années	Charbon	Lignite	Pétrole	Gaz naturel	Énergie hydraulique	Total	Énergie électrique par rapport au total
1860 . .	98,0	1,4	—	—	0,6	100	. . .
1870 . .	97,2	1,8	0,5	—	0,5	100	. . .
1880 . .	95,6	2,2	1,6	—	0,6	100	. . .
1890 . .	93,5	2,4	2,7	1,0	0,4	100	. . .
1900 . .	92,0	2,9	3,5	1,2	0,4	100	. . .
1910 . .	90,0	2,9	5,1	1,7	0,3	100	. . .
1920 . .	84,5	3,5	9,1	2,3	0,6	100	. . .
1930 . .	74,5	3,8	16,2	4,4	1,1	100	2,0
1940 . .	69,0	5,0	19,3	5,5	1,2	100	3,0
1950 . .	56,7	4,4	27,1	10,2	1,6	100	4,3
1953 . .	51,3	4,8	30,1	12,0	1,8	100	5,4

et de gaz naturel se sont considérablement développées.

En ce qui concerne l'énergie électrique, l'augmentation de la consommation est particulièrement rapide, surtout si on la compare à celle de la consommation totale en énergie, mais la proportion d'énergie hydroélectrique tend à diminuer au bénéfice de l'énergie thermique, du moins dans les régions les plus industrialisées.

L'on ne peut, dans ce domaine également, que souligner des tendances, le problème de la substitution d'une forme d'énergie à une autre nécessitant à elle seule une étude plus complète qui tiendrait compte des domaines propres à chaque énergie et dans lesquels toute substitution est limitée.

Chapitre III

Essai de bilan

Nous croyons avoir suffisamment insisté sur les difficultés que l'on peut rencontrer en établissant un bilan énergétique pour l'avenir, pour pouvoir néanmoins essayer de dégager quelques tendances dans l'utilisation probable des ressources conventionnelles. Cette tentative est en effet d'autant plus importante qu'une des principales utilisations de l'énergie nucléaire sera la production d'énergie électrique.

La production d'énergie hydroélectrique représente le tiers environ de la production d'énergie électrique mondiale et les ressources hydrauliques ne sont pas susceptibles d'autres usages énergétiques. Pour estimer leurs limites, un calcul a été effectué sur la base des deux hypothèses suivantes :

a) la consommation d'énergie électrique continuera à doubler tous les 10 ans;

b) la proportion entre l'énergie thermique et l'énergie hydroélectrique restera constante; cela revient donc a dire que la production d'énergie hydroélectrique doublera tous les 10 ans.

Les résultats de ces calculs ont été reportés sur la partie gauche du tableau 13.

En ce qui concerne l'utilisation des combustibles fossiles, leur épuisement a été calculé en supposant qu'ils doivent assurer une augmentation annuelle de 3 pour cent de leur consommation actuelle (coefficient moyen d'accroissement de la consommation mondiale déduit du document présenté par l'ONU [1]; les calculs ont été effectués en se basant sur les chiffres de consommation de l'année 1952, qui figurent également dans ce document). Les résultats ont été reportés à la droite du tableau 13.

Malgré son imprécision, due aux raisons expliquées dans le chapitre précédent, la lecture de ce tableau donne une idée de l'épuisement probable des ressources conventionnelles. Elle permet de classer *grosso modo* les pays en trois catégories : ceux dont l'ensemble des ressources conventionnelles sera soit pleinement utilisé, soit épuisé à très bref délai; ceux au contraire qui disposeront, même après l'an 2000, de ressources suffisantes; ceux enfin dont les ressources deviendront insuffisantes au cours de la période considérée pour satisfaire l'augmentation des besoins.

Cette classification sera précisée dans la deuxième partie, en tenant compte des prix et des renseignements plus détaillés fournis par certains pays.

DEUXIÈME PARTIE

INFLUENCE DES PRIX

Chapitre premier

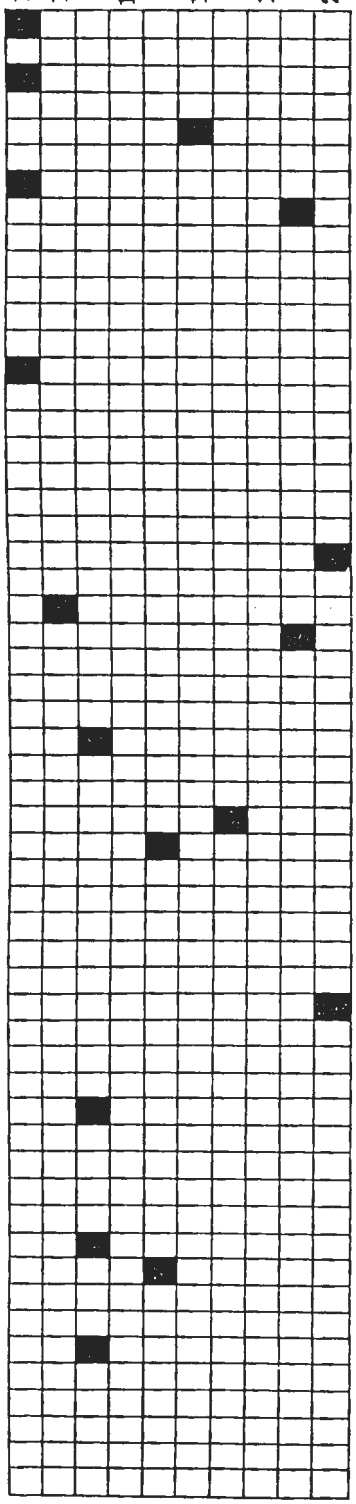
Tendances actuelles des prix de revient de l'énergie électrique

Les pays aménagent tout d'abord les sites qui sont les plus faciles et, partant, les moins coûteux à exploiter. Le prix de revient de l'énergie *hydroélectrique* a donc tendance à croître au fur et à mesure que l'aménagement du potentiel hydraulique se réalise. En fait, la question est plus complexe et il serait difficile d'établir, même par pays, des courbes de ces prix en fonction du degré d'équipement. Une difficulté complémentaire provient de ce que la qualité de l'énergie produite diffère selon qu'il s'agit de centrales au fil de l'eau ou de centrales à réservoir. D'une manière générale, cependant, on peut constater que l'augmentation est peu sensible sur une période assez longue, car elle est compensée par l'influence du progrès technique. Celui-ci s'est manifesté récemment, en particulier dans le percement des galeries et dans la construction de nouvelles turbines pour équiper les basses chutes. Par ailleurs, la concentration croissante des équipements tend à s'opposer à la baisse de leur rendement. Mais à partir d'un certain degré d'aménagement, cependant, qui est voisin de la limite du potentiel considéré comme rentable, les prix augmentent rapidement.

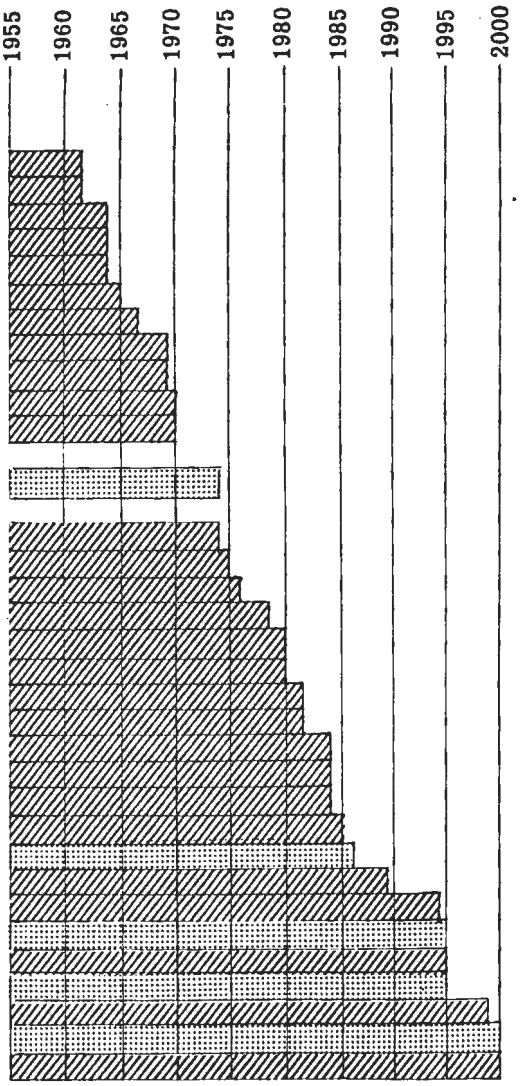
La diminution de la consommation spécifique de charbon par kilowattheure produit dans une centrale *thermique* est un phénomène bien connu. Cette consommation est passée, aux États-Unis, de 3,1 kg de charbon en 1920 à 0,5 kg en 1953 [9]. Il ne s'agit là que d'un rendement moyen, mais si l'on considère l'évolution de cette consommation spécifique pour certaines unités caractéristiques, on constate qu'elle est passée en Europe de 7 000 kcal en 1920 à 2 760 kcal en 1955 pour les plus modernes. Le rendement moyen des centrales belges, qui est évalué à 3 800 kcal pour 1955, devrait évoluer selon les prévisions de ce pays jusqu'à 2 400 kcal en 1975 et 2 300 en l'an 2000 [6]. Cette diminution est due à l'utilisation de températures et de pressions toujours plus élevées, et à l'augmentation du rendement thermodynamique de la limite duquel d'ailleurs on est très proche. Elle est également facilitée par l'emploi de groupes plus puissants. (Aux États-Unis, la Detroit Edison Company et la Consolidated Edison Company prévoient pour 1957 l'installation de groupes de

Tableau 13

Epuisement des ressources en charbon, lignite, pétrole et gaz naturel, en supposant qu'elles doivent assurer une augmentation annuelle de 3 pour cent de leur consommation annuelle



Périodes durant lesquelles les ressources hydrauliques pourraient faire face à une consommation en énergie hydroélectrique qui doublerait tous les dix ans



Pays ou groupe de pays	Pourcentage de ces ressources utilisé en l'an 2000	Pourcentage des ressources hydrauliques aménagé en l'an 2000
Israël	58	
Pays-Bas	58	
Danemark		
Rép. féd. d'Allemagne	6	
Italie		
Irlande	36	
Suisse		
Finlande		
Etats-Unis et Alaska	8	
Japon	30	
Suède	52	
France	50	
Canada	10	
Uruguay		
Europe — Nord-Ouest	14	
Europe — Est	12	
Europe — Sud	30	
Espagne	20	
Tchécoslovaquie	...	
Royaume-Uni	15	
Nouvelle-Zélande		
Belgique	62	
Norvège		
Autriche		
Australie	12	
Monde	8	
Pologne	...	
Portugal		
Bulgarie	...	
Océanie	12	
Brésil		
Thaïlande		
Extrême-Orient	14	
Pakistan		
Amérique centrale	87	
U.R.S.S.	...	
Amérique du Sud	25	
Chili		
Hongrie	...	74
Colombie	3	69
Yougoslavie	9	60
Philippines		57
Pérou	6	45
Asie du Sud	7	44
Inde	7	42
Indonésie	36	42
Equateur		35
Afrique du Nord-Est		29
Asie du Sud-Est	43	28
Roumanie	...	26
Bolivie		25
Venezuela	31	22
Argentine	25	18
Asie de l'Ouest	8	3
Afrique centrale	13	2
Turquie	...	2

1116/2

300 000 kW). Il en résulte donc que le nombre de calories consommées ne croît pas proportionnellement à la production d'énergie thermique. (En France par exemple, un quadruplement de la production d'énergie thermique entraînerait seulement un triplement des calories nécessaires [10].)

Par contre, les prix du charbon ont tendance à augmenter et, de plus, le pourcentage des charbons de déchet étant finalement limité, les centrales thermiques seront obligées d'utiliser de plus en plus des charbons de meilleure qualité. La déclassification des anciens groupes et le coût de leur remplacement par des groupes modernes conduiront également à des dépenses qui ne seront pas toujours compensées par le gain réalisé grâce à la différence de rendement des installations.

Plus généralement, qu'il s'agisse d'ailleurs d'installations hydrauliques ou d'installations thermiques, l'interconnexion des réseaux et la concentration de la production qui a entraîné une diminution des frais d'exploitation, tendent aussi à abaisser le prix de revient, mais leur développement est limité. Le progrès ne semble donc pas pouvoir compenser les éléments qui provoquent une augmentation du prix de l'énergie électrique produite, augmentation qui apparaît principalement dans les pays industrialisés.

Le prix de revient du kilowattheure produit par une centrale *nucléaire* fait l'objet de mémoires présentés à une autre séance. Nous ne citerons donc pas de chiffres dans ce domaine, retenant seulement que ce prix est en baisse constante et qu'il n'est pas encore stabilisé.

En dehors de la nécessité relative dans laquelle se trouvent les différents pays d'importer de l'énergie pour combler le déficit de leur balance énergétique, c'est le point d'intersection des courbes de prix de revient du kilowattheure produit par leurs ressources conventionnelles et du kilowattheure produit par les centrales nucléaires qui constitue le second élément déterminant de l'intégration de ces dernières.

Chapitre II

Précisions apportées au bilan énergétique*

Il est apparu que le bilan énergétique de certains pays était sur le point d'être déficitaire à une échéance très rapprochée (à l'échelle de 10 ou 15 ans au maximum). C'est en particulier le cas du Danemark, d'Israël, du nord-est de la Thaïlande, de l'Égypte, dont les ressources naturelles sont minimes, de la Finlande, de l'Italie et de la Suisse, dont les ressources sont importantes mais en grande partie aménagées. Ces pays vont donc se trouver très rapidement devant la nécessité d'importer un complément d'énergie. Dans ce cas, le prix compétitif pour l'énergie nucléaire n'est plus obligatoirement celui de l'énergie produite à partir des sources conventionnelles, mais celui fixé par l'importation d'une autre forme d'énergie, charbon ou pétrole.

A l'opposé, le bilan de certains pays semble être largement excédentaire pour de nombreuses années encore. La Norvège, la Yougoslavie et l'Australie, (sauf le sud-est de ce pays), rentrent dans cette catégorie. Le problème de l'intégration de l'énergie nucléaire ne se pose donc pas pour eux d'une façon pressante, et ils peuvent espérer bénéficier d'une diminution du prix de revient de cette énergie avant que d'envisager sa production. Ce prix, en effet, devrait être très bas pour entrer en compétition avec celui de l'énergie fournie sur le plan national (le prix de revient du kilowattheure hydraulique produit en Norvège se situe par exemple actuellement aux environs de 0,002 dollar). De tels pays cependant peuvent utiliser marginalement l'énergie nucléaire, soit en des régions moins favorisées, afin d'éviter la construction de lignes de transport, soit pour constituer un appoint au réseau aux heures de pointe.

Entre ces deux extrêmes, se situent un très grand nombre de pays pour lesquels l'énergie nucléaire devra s'intégrer *progressivement* dans le système énergétique actuel, au cours de cette période de 50 ans à venir, et c'est surtout pour eux que l'influence du prix de revient est importante.

Si le prix de revient du kilowattheure fourni industriellement par une centrale nucléaire se stabilise à un niveau légèrement supérieur à celui du prix moyen de l'énergie électrique provenant des sources conventionnelles, l'énergie nucléaire ne sera utilisée que pour compléter et remplacer progressivement ces dernières.

S'il est légèrement inférieur à ce prix moyen, cela entraînera une concurrence avec les sources conventionnelles, qui sera d'ailleurs freinée par certains facteurs :

a) La modification des industries extractives entraînerait tout d'abord des répercussions économiques et sociales dont les pays doivent tenir compte; *b*) l'utilisation des installations existantes sera, dans la plupart des cas, prolongée afin d'en permettre un amortissement rationnel; *c*) la reconversion de l'industrie charbonnière en vue de son orientation vers les produits de synthèse, qu'une telle concurrence entraînerait, ne pourrait se faire immédiatement.

Par contre, si le prix de l'énergie nucléaire devient très sensiblement inférieur au prix moyen, cette concurrence pourrait s'accroître et simultanément, de nouveaux débouchés s'ouvrant, la progression des besoins se trouverait augmentée.

Les prix compétitifs indiqués par les différents pays sont extrêmement variables. La Birmanie par exemple, où le prix de vente de l'énergie électrique pour les usages domestiques est environ 0,105 dollar par kilowattheure et le prix de vente pour l'industrie 0,052 dollar, envisagerait dès main-

* Il n'est question ici que des pays ayant fourni des renseignements au Secrétariat.

tenant une installation de 250 000 kW si celle-ci pouvait produire de l'énergie à 0,008 dollar le kilowattheure. Au Japon, le prix combiné de l'énergie hydroélectrique et thermique se situe actuellement à 0,015 dollar environ et il est prévu qu'il augmentera jusqu'à 0,018 à 0,020 dollar. Cependant, la plupart des pays ont pris comme base le taux de 0,006 dollar par kilowattheure. C'est le cas de l'Inde et du Canada, en particulier. Sur cette base, le Canada envisagerait une production correspondant à 100 000 kW dès l'année 1960, pour alimenter principalement certaines régions comme le sud de l'Ontario, les provinces maritimes et le sud du Manitoba, dont les ressources sont moins importantes.

La disparité entre les prix indiqués dans les quelques réponses parvenues au Secrétariat ne fait que refléter la disparité qualitative qui existe entre les différentes ressources naturelles, et qui s'ajoute à celle, quantitative, qui ressort de la première partie. Mais pour la plupart des pays industrialisés, le prix de revient du kilowattheure produit par une centrale thermique est à peu près commun, et semble s'établir actuellement aux environs de 0,006 à 0,007 dollar. C'est donc ce prix qui, dans l'état actuel de la technique, semble être celui à partir duquel l'intégration de l'énergie nucléaire serait susceptible d'être envisagée.

Une mention spéciale doit être faite pour les petites piles dont l'utilisation pourrait certainement s'étendre très rapidement, en particulier dans les pays sous-développés. Le prix de l'énergie produite par de telles piles pourrait d'ailleurs être supérieur à celui des grosses unités, car il éviterait la construction de réseaux de transport et leur usage serait caractérisé par une très grande souplesse. C'est ainsi que le Canada indique que de telles piles, d'une puissance de 2 000 à 3 000 kW, pourraient déjà être installées, même si le prix du kilowattheure fourni s'établissait aux environs de 0,020 dollar.

CONCLUSIONS

Les ressources énergétiques conventionnelles (annexe I) et les besoins sont inégalement répartis à la surface du globe. Le manque de corrélation entre leur inégale localisation n'est atténué que dans une faible mesure par le transport de l'énergie ou la substitution d'une forme d'énergie à une autre. Le degré d'utilisation de ces sources en fonction de la consommation ne peut donc être déterminé que par une étude approfondie effectuée sur le plan national. La valeur de telles prévisions, d'ailleurs, diminue avec la longueur de la période sur laquelle elle s'étend. En l'absence de telles analyses, un bilan quantitatif a été dressé sur la base de certaines hypothèses simples, que la diversité dans le degré d'industrialisation des différents pays rend évidemment très précaire. Un tel bilan constitue le premier élément qui permet de déceler la nécessité pour telle région déterminée de recourir à une nouvelle source d'énergie.

La courbe des prix de revient de l'énergie électrique produite à partir des sources conventionnelles est croissante. Celle de l'énergie nucléaire tend au contraire à décroître, mais les prix ne sont pas encore stabilisés. Le point de rencontre de ces deux courbes constitue pour chaque pays le second élément qui lui permet d'estimer le moment où il peut faire appel à cette nouvelle source d'énergie.

Dans un très petit nombre de pays seulement, semble-t-il, l'énergie nucléaire ne sera appelée à jouer aucun rôle durant la période de 50 années envisagée. Les limites des sources conventionnelles d'énergie dues à l'augmentation croissante des besoins, ainsi que l'augmentation de leur prix de revient, vont au contraire provoquer, pour un nombre grandissant de pays, une nécessité impérieuse d'utiliser cette nouvelle forme d'énergie. Pour certains d'entre eux, cette nécessité se fera sentir à très court terme. Pour la grande majorité, et sur la base des prix actuels, cette intégration sera progressive. Il est donc certain que sans même vouloir préjuger les progrès qui seront nécessairement accomplis dans ce domaine, l'énergie nucléaire deviendra rapidement un élément prépondérant de l'équilibre énergétique mondial.

BIBLIOGRAPHIE

1. Guyol N. B., *Besoins du monde en énergie en 1975 et en l'an 2000.* Voir dans le présent volume le mémoire P/902, séance 2.
2. Langevin Paul, *Statistique et déterminisme.*
3. Robinson E. A. G., *Le monde a besoin d'une nouvelle source d'énergie.* Voir dans le présent volume le mémoire P/757, séance 2.
4. Ailleret P., *Prévisions d'avenir.*
5. Putnam P., *Energy in the future*, 1953.
6. Mele R. van, *Evolution probable des besoins d'énergie en Belgique et rôle que pourra jouer l'énergie nucléaire.* Voir dans le présent volume le mémoire P/949, séance 2.
7. *Le potentiel hydroélectrique de l'Europe, ses limites théoriques, techniques et économiques*, E/ECE/EP/ 131, Genève, mai 1953.
8. *Le prix des produits pétroliers en Europe occidentale*, E/ECE/205, Genève, mai 1955.
9. Hughes E. T., *Un siècle d'accroissement des besoins d'énergie électrique aux États-Unis.* Voir dans le présent volume le mémoire P/469, séance 2.
10. Ailleret P. et Taranger P., *Intégration de l'énergie nucléaire parmi les moyens de production de l'énergie en France.* Voir dans le présent volume le mémoire P/327, séance 5.

ANNEXE I

Bilan global des réserves de charbon, lignite, pétrole, gaz naturel et énergie hydroélectrique, et réserves d'énergie de tout ordre, par habitant

(Équivalent électricité du pouvoir calorifique total, en milliards de kilowattheures) [a]

Pays	Population 1er juillet 1953	Charbon Réserves prouvées et probables		Lignite Réserves prouvées et probables		Total Combustibles solides	Pétrole Réserves prouvées		Réserves de gaz naturel dans les gisements en exploitation		Énergie hydroélectrique (milliards de kWh par an)		Énergie totale [b, c]	
	Millions	Date d'estimation	Milliards de kWh	Date d'estimation	Milliards de kWh	Total (milliards de kWh)	Date d'estimation	Milliards de kWh	Date d'estimation	Milliards de kWh	Date d'estimation	Milliards de kWh	Milliards de kWh	Par habitant, (milliers de kWh)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
AMÉRIQUE														
Total	347,8		11 299 672		1 272 290	12 571 962		72 094		66 710		905	13 771 765	39 597
Amérique du Nord														
Canada	14,8	1953	515 056	1953	63 155	578 211	fin 1953	3 720	1953	2 703	1952	218	802 634	54 232
Groenland	0,02													
Alaska	0,2	1949	195 200	1949	157 250	352 450	fin 1953	1			1947	8	360 451	18 023
États-Unis	159,6	1952	10 424 528	1952	1 050 875	11 475 403	fin 1953	46 921	1953	63 454	1950	216	11 957 777	74 923
États-Unis et Alaska	159,8		10 619 728		1 208 125	11 827 853		46 922		63 454		224	12 318 228	77 085
Total	174,62		11 134 784		1 271 280	12 406 064		50 642		66 157		442	13 120 862	75 140
Amérique centrale et Antilles														
Iles Bahama	0,08													
Barbade	0,02													
Bermudes	0,04													
Honduras britannique	0,1											1	1 000	10 000
Costa-Rica	0,9											8	8 000	889
Cuba	5,8						fin 1953	2				—	2	0,3
République Dominicaine	2,3											—		
Salvador	2,0											2	2 000	1 000
Guadeloupe	0,3 [d]											—		
Guatemala	3,0											13	13 000	4 333
Haïti	3,2											—		
Honduras	1,6	1913	8	1913	10	18						8	8 018	5 011
Jamaïque	1,5											—		
Iles sous le Vent . . .	0,1													
Martinique	0,3													
Mexique	28,1		26 080			26 080		2 356		354	1950	51	79 790	2 840
Antilles néerlandaises .	0,2										1950	1	1 000	5 000
Nicaragua	1,2										1950	7	7 000	5 833

ANNEXE I *(suite)*

Pays	Population 1er juillet 1953	Charbon Réserves prouvées et probables		Lignite Réserves prouvées et probables		Total Combustibles solides	Pétrole Réserves prouvées		Réserves de gaz naturel dans les gisements en exploitation		Énergie hydroélectrique (milliards de kWh par an)		Énergie totale[b,c]	
	Millions	Date d'estimation	Milliards de kWh	Date d'estimation	Milliards de kWh	Total (milliards de kWh)	Date d'estimation	Milliards de kWh	Date d'estimation	Milliards de kWh	Date d'estimation	Milliards de kWh	Milliards de kWh	Par habitant, (milliers de kWh)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
Panama	0,9										1950			
Zone du Canal	0,1										1950	4	4 000	4 000
Porto-Rico	2,2											—		
La Trinité et Tobago	0,7						fin 1953	474					474	677
Iles du Vent	0,3													
Total	55,12		26 088		10	26 098		2 832		354		95	124 284	2 255
Amérique du Sud														
Argentine	18,4	1953	2 800			2 800	fin 1953	470	1950	146		32	35 416	1 924
Bolivie	3,1						fin 1953	16			1950	22	22 016	7 102
Brésil	55,8	1953	4 000			4 000	fin 1953	66	1953	13	1952	115	119 079	2 134
Guyane britannique	0,5										1950	22	22 000	44 000
Chili	6,1	1953	2 400		1 000	3 400	fin 1953	64	1952	40	1952	43	46 504	7 024
Colombie	12,1	1952	96 000			96 000	fin 1953	682			1950	32	128 682	10 635
Équateur	3,5						fin 1953	42			1950	8	8 042	2 297
Falkland	0,002													
Guyane française	0,03										1950	4	4 000	133 300
Paraguay	1,5										1950	17	17 000	11 330
Pérou	9,0	1953	32 000			32 000	fin 1953	360			1950	38	70 360	7 817
Surinam	0,2										1950	7	7 000	35 000
Uruguay	2,5										1950	2	2 000	800
Venezuela	5,4		1 600			1 600	fin 1953	16 920			1950	26	44 520	8 244
Total	118,1		138 800		1 000	139 800		18 610		199		368	526 619	4 459
Amérique centrale et du Sud	173,2		164 888		1 010	165 898		21 452		553		463	650 903	3 758
AFRIQUE														
Total	211,2		613 712		633	614 345		243		—		1 531	2 145 636	10 159
Nord-Est africain														
Algérie	9,4	1952	96			96	fin 1953	6			1953	2	2 102	224
Somalie britannique	0,6													
Égypte	21,9						fin 1953	224				5	5 224	239
Erythrée	1,0[d]													
Éthiopie	15,0										1950	34	34 000	2 266
Somalie française	0,06													
Somalie italienne	1,3													
Libye	1,5													

Maroc	8,2	1952	1 040			1 040	fin 1953	13				3	4 053	494
Afrique du Nord espagnole	0,1													
Afrique occidentale espagnole	0,08													
Soudan	8,8											4	4 000	455
Tanger	0,2													
Tunisie	3,6				3	3					1951	—		
Total	71,7		1 136		3	1 139		243		—		48	49 382	689
Afrique centrale														
Angola	4,2													
Congo belge	12,2	1953	720			720					1950	34	34 000	8 095
Cameroun britannique	1,4										1948	773[f]	773 720	63 420
Togo britannique	0,4													
Iles du Cap-Vert	0,2													
Cameroun français	3,1											42	42 000	13 548
Afrique - Équatoriale française	4,5													
Togo français	1,0											314[g]	314 000	69 777
Afrique - Occidentale française	17,4[c]										1949	14[h]	14 000	805
Gambie	0,3													
Côte de l'Or	4,1											12[i]	12 000	2 927
Kenya	5,9										1937	40[j]	40 000	6 780
Libéria	1,6[d]											34	34 000	21 250
Madagascar	4,5[e]	1952	2 400			2 400						40[d]	42 400	9 422
Ile Maurice	0,5													
Mozambique	5,9	1937	5 600	1937		5 600					1937	30	35 600	6 034
Nigéria	30,0	1937	2 400		500	2 900						78[k]	80 900	2 697
Rhodésie du Nord	2,0										1950	21	21 000	10 500
Nyassaland	2,5				125[l]	125					1937	10	10 125	4 050
Guinée portugaise	0,5													
Réunion	0,3													
Ruanda-Urundi	4,1													
Sainte-Hélène	0,005													
Seychelles	0,04													
Sierra-Leone	2,0				5	5						15	15 005	7 503
Guinée espagnole	0,2													
Tanganyika	8,1		9 200			9 200						24	33 200	4 099
Ouganda	5,3							...						
Zanzibar	0,3													
Rhodésie du Sud	2,3	1953	33 696			33 696							33 696	14 650
Total	124,8		54 016		630	54 646		—		—		1 481	1 535 646	12 305
Afrique du Sud														
Bassoutoland	0,6										1950	—		
Betchouanaland	0,3													

Voir notes p. 115.

ANNEXE I *(suite)*

Pays	Population 1er juillet 1953	Charbon Réserves prouvées et probables		Lignite Réserves prouvées et probables		Total Combustibles solides	Pétrole Réserves prouvées		Réserves de gaz naturel dans les gisements en exploitation		Énergie hydroélectrique (milliards de kWh par an)		Énergie totale[b,c]	
	Millions	Date d'estimation	Milliards de kWh	Date d'estimation	Milliards de kWh	Total (milliards de kWh)	Date d'estimation	Milliards de kWh	Date d'estimation	Milliards de kWh	Date d'estimation	Milliards de kWh	Milliards de kWh	Par habitant (milliers de kWh)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
Sud-Ouest africain . .	0,4											1	1 000	2 500
Souaziland	0,2		15 360			15 360							15 360	76 800
Union Sud-Africaine .	13,2	1953	543 200			543 200					1950	1	544 248	41 231
Total	14,7		558 560			558 560		—		—		2	560 608	38 137
U.R.S.S.	207,01	1953	9 920 000	1937	527 732	10 447 732		16 284	1953	10 261	1932	464	11 045 677	53 358
EUROPE														
Total	401,3		4 675 040		431 791	5 106 831		2 070		3 482		574	5 711 019	14 231
Europe du Nord-Ouest														
Autriche	6,9	1950	176	1953	5 843	6 019		354			1953	40	46 373	6 721
Belgique-Luxembourg	9,1	1954	47 904			47 904					1952	1	48 904	5 374
Danemark	4,4			1953	125	125						—	125	28
Finlande	4,1			1955	2 400[m]*	2 400					1953	17*	19 400	4 732
France	42,9	1954	96 000	1953	1 050	97 050		60	1950	64	1950	60	158 674	3 699
République fédérale d'Allemagne . . .	51,2[a]	1954	1 792 000	1953	157 500	1 949 500		593		. . .	1950	16	1 966 093	38 400
Islande	0,1										1950	4	4 000	40 000
Irlande	2,9	1950	144		6 976[m]	7 120					1951	1	8 120	2 800
Pays-Bas	10,5	1954	32 000	1950	20	32 020		173		. . .		—	32 193	3 066
Norvège	3,3		(64 000)[o]			64 000[o]					1952	105	169 000	51 212
Sarre	1,0	1954	64 000			64 000						—	64 000	64 000
Suède	7,2	1953	800	1955	1 600[m]*	2 400					1948	80*	104 720	14 544
Suisse	4,9											30*	30 000	6 122
Royaume-Uni	50,9	1954	1 368 000		1 200[m]	1 369 200		6			1951	9	1 379 022	27 093
Total	199,4		3 465 024		176 714	3 641 738		1 186		64		363	4 030 624	20 208
Europe orientale														
Bulgarie	7,5	1953	1 120	1953	3 500	4 620					1950	6	10 620	1 416
Tchécoslovaquie . . .	12,3[d]	1954	48 000	1953	31 250	79 250	fin 1953	12		0,3		7	86 262	7 013
République démocratique allemande . .	18,3	1953	1 800	1953	122 500	124 300					1950	2	126 300	6 902
Hongrie	9,6	1953	160	1953	4 000	4 160		62		39	1954	2	6 261	652
Pologne	26,5	1952	1 088 000		24 325	1 112 325		32				6	1 118 357	42 202
Roumanie	16,5[d]		384		7 097	7 481		644		2 608		22	32 733	1 984
Total	90,7		1 139 464		192 672	1 332 136		750		2 647		45	1 380 533	15 221

Europe méridionale														
Albanie	1,2							36		...	1950	3	3 036	2 530
Grèce	7,8			1948	5 000	5 000					1950	4	9 000	1 154
Italie	48,1	1950	5 696	1950	1 072	6 768		8		742[p]	1946	52*	59 518	1 237
Portugal	8,6	1953	224	1953	83	307					1953	8	8 307	966
Espagne	28,5		64 000	1953	3 750	67 750						32	99 750	3 500
Yougoslavie	17,0	1952	632	1952	52 500*	53 132		90*	1952	29*	1 954	67*	120 251	7 074
Total	111,2		70 552		62 405	132 957		134		771		166	299 862	2 697
ASIE														
Total	1 435,58		3 169 488		21 938	3 191 426		131 892		849		1 228	4 552 167	3 171
Asie occidentale														
Protectorat d'Aden	0,6													
Bahrein	0,1							408					408	4 080
Chypre	0,5													
Iran	20,2		16 000			16 000		20 748		...		2	38 748	1 918
Irak	4,9							22 476		...		2	24 476	4 995
Israël	1,7											—		
Jordanie	1,4											—		
Koweit	0,2[d]							33 192		...			33 192	165 960
Liban	1,3										1951	1	1 000	769
Mascate et Oman	0,6													
Katar	0,02[d]							2 352					2 352	117 600
Arabie saoudite	7,0							48 420		...			48 420	6 917
Syrie	3,5										1953	1	1 000	286
Oman sous régime de Traité	0,1													
Turquie	22,5	1950	12 000	1950	695	12 695		44			1948	90[q]	102 739	4 566
Yémen	4,5													
Total	69,1		28 000		695	28 695		127 640		...		96	252 335	3 652
Asie méridionale														
Afghanistan	12,0		400			400						4	4 400	367
Boutan	0,3													
Ceylan	8,2										1948	3	3 000	366
Inde	372,0	1953	499 416	1945	7 083	506 499		77			1950	200[r]	706 576	1 899
Népal	7,0													
Pakistan	75,8[s]			1952	410	410	fin 1953	35		1[p]	1952	4	4 446	59
Inde portugaise	0,7													
Total	476,0		499 816		7 493	507 309		112		1		211	718 422	1 509
Asie du Sud-Est														
Brunéi, Sarawak, Bornéo sept. brit.	0,95		600		33	633	fin 1953	802				—	1 435	1 511
Birmanie	19,0				662	662	fin 1953	74				8[h]*	8 736	460

Voir notes p. 115.

ANNEXE I *(fin)*

Indochine	31,0	1952	8 000			8 000					36	44 000	1 419
Indonésie	79,9		4 000[n]		6 250	10 250	fin 1953	3 083			1933	26	39 333	492
Malaisie et Singapour	6,8		488	1953	168	656						8	8 656	1 273
Nouv.-Guinée néerl.	0,7													
Philippines	21,0		320		152	472						14*	14 472	689
Timor portugais	0,7													
Thaïlande	19,6				50	50*		38*				8*	8 088	413
Total	179,7		13 408		7 315	20 723		3 997				100	124 720	694
Extrême-Orient														
Chine	582,6[d]		2 472 000		5 777	2 477 777	fin 1953	41				685	3 162 818	5 429
Formose	8,3		800*			800	fin 1953	1				15*	15 801	1 904
Hong-kong	2,3													
Japon	86,7	1951	148 800*	1951	645	149 445	fin 1953	101	1949	848	1952	103*	253 394	2 923
Corée du Nord	8,6[d]	1950	6 664	1950	13	6 677						18[t]	24 677	823
Corée du Sud	21,4													
Macao	0,2													
Iles Riou-Kiou	0,9													
Total	711,0		2 628 264		6 435	2 634 699		143		848		821	3 456 690	4 862
Océanie														
Samoa américain	0,02													
Australie	8,8	1953	134 400	1953	102 500	236 900	fin 1953	1			1953	11	248 116	28 195
Iles Salomon brit	0,1													
Archipel Cook, Niue, Tokelau	0,02													
Iles Fidji	0,3													
Océanie française	0,06													
Archipels Gilbert et Ellice	0,04													
Guam	0,03													
Hawaï	0,5										1936	1	1 000	2 000
Nauru	0,003													
Nouvelle-Calédonie	0,1	1952	120			120						—	120	1 200
Nouvelle-Guinée et Papouasie	1,5						fin 1953	154				15	15 154	10 103
Nouvelles-Hébrides	0,05													
Nouvelle-Zélande	2,0	1952	632	1952	2 350	2 982						20	22 982	11 491
Ile Norfolk	0,001													
Iles du Pacifique	0,06													
Iles Tonga	0,05													
Samoa occidental	0,09													
Total, Océanie	13,7		135 152		104 850	240 002		155				47	287 372	20 976
TOTAL MONDIAL	2 616,6		29 813 064		2 359 234	32 172 298		222 738		81 302		4 749	37 513 635	14 337

Voir notes p. 115.

Notes à l'annexe I.

* D'après les chiffres fournis dans les documents ou résumés reçus pour la Conférence.

[a] Les équivalences ont été calculées comme suit : 1 tonne de houille = 8 000 kWh; 1 tonne de lignite = 2 500 kWh; 1 tonne de pétrole = 12 000 kWh; 1 m³ de gaz naturel = 10,6 kWh. Dans la majorité des cas, l'estimation des ressources d'énergie hydroélectrique en kWh est basée sur la capacité à Q95 ou à l'étiage, en supposant une utilisation annuelle de 8 000 heures.

[b] Y compris l'énergie hydroélectrique en kWh × 1 000.

[c] Y compris la teneur en produits pétroliers des schistes bitumineux, estimée comme suit :

	10^9 kWh
États-Unis	155 999
Union Sud-Africaine	48
U.R.S.S.	107 400
France	1 500
Suède	22 320
Royaume-Uni	816
Australie	215
Monde entier	288 298

[d] Estimation.

[e] Chiffres de 1952.

[f] Y compris le Ruanda-Urundi.

[g] Y compris la capacité brute du Bas-Congo, où ce fleuve longe la frontière de l'Afrique équatoriale française, soit 25 300 000 kW à Q95.

[h] Capacité potentielle des emplacements prospectés.

[i] Y compris le Togo britannique.

[j] Kenya et Ouganda.

[k] Y compris le Cameroun britannique.

[l] Y compris les charbons bitumineux et semi-bitumineux.

[m] Équivalent d'électricité estimé des gisements de tourbe exploitables.

[n] Y compris Berlin-Ouest.

[o] Gisements du Spitzberg.

[p] Chiffres partiels.

[q] Première estimation effectuée par le Secrétariat de la CEE.

[r] Potentiel maximum en énergie hydroélectrique.

[s] Chiffres de 1951.

[t] Corée du Nord et Corée du Sud. La majeure partie des ressources en énergie hydroélectrique se trouve en Corée du Nord.

ANNEXE II

Comparaison de l'activité économique dans différents pays d'après la production manufacturière et minière (1953)

Pays ou région	Pourcentage de la population mondiale (juillet 1953)[a]	Indice de l'activité économique (production manufacturière et minière) par rapport à la population (moyenne mondiale = 100)[a]
Afrique (moins l'Égypte)	*7,24*	*11*
dont : Union Sud-Afric.	0,50	118
Autres pays	6,74	3
Amérique du Nord	*6,68*	*588*
dont : Canada	0,57	414
États-Unis	6,11	605
Amérique centr. et du Sud.	*6,64*	*42*
dont : Argentine	0,70	103
Brésil	2,13	28
Chili	0,23	87
Mexique	1,07	43
Autres pays	2,51	34
Asie	*32,55*	*6*
dont : Inde	14,22	4
Japon	3,31	30
Turquie	0,86	15
Autres pays	14,16	3
Europe	*11,87*	*165*
dont : Autriche	0,26	127
Belgique	0,34	347
Danemark	0,17	153
Finlande	0,16	206
France	1,64	163
Allemagne occid.	1,96	154
Grèce	0,30	23
Irlande (Rép.)	0,11	64
Italie	1,84	74
Pays-Bas	0,40	180
Norvège	0,13	200
Espagne	1,09	24
Suède	0,28	328
Royaume-Uni	1,95	393
Yougoslavie	0,65	40
Océanie	*0,52*	*177*

[a] Non compris l'Allemagne orientale, la Bulgarie, la Chine, la Hongrie, la Pologne, la Roumanie, la Tchécoslovaquie et l'U.R.S.S.

Le rôle de l'énergie atomique en Inde et ses possibilités dans l'immédiat

par H. J. Bhabha *

Cet exposé donne une idée très sommaire du rôle que l'énergie atomique est appelée à jouer dans le développement économique et industriel de l'Inde. Dans le premier chapitre, nous passons en revue les ressources du pays en énergie ainsi que ses réserves en combustibles classiques et en combustible atomique. Le chapitre II traite de la consommation actuelle d'énergie et évalue l'accroissement de cette consommation d'ici 1985. Le rôle de l'énergie atomique, sujet qui se divise de lui-même en deux parties, fait l'objet des chapitres III et IV. Le chapitre III est consacré à l'apport à longue échéance de l'énergie atomique dans une économie très industrialisée. Les conclusions générales auxquelles nous aboutissons reposent sur des données à peu près sûres et font partie du tableau que présentera le monde dans l'avenir encore lointain où les combustibles nucléaires auront remplacé, en tant que source d'énergie, les combustibles classiques épuisés ou en voie d'épuisement rapide. Dans le chapitre IV, nous étudions les possibilités économiques de l'énergie électronucléaire en Inde dans l'avenir immédiat et notamment au cours des dix prochaines années. Bien que ces conclusions soient sujettes à revision, elles n'en sont pas moins intéressantes du fait qu'elles démontrent que l'énergie électronucléaire pourrait affronter la concurrence des autres combustibles dans certaines régions du pays, et ceci dans un avenir assez rapproché pour justifier une étude plus approfondie de ce problème.

I. — RESSOURCES DE L'INDE EN ÉNERGIE

Énergie hydraulique

Le potentiel hydroélectrique global de l'Inde est évalué à 35-40 millions de kilowatts [1] **. Le rapport Paley estime à 105 millions de kilowatts le chiffre correspondant pour les États-Unis. On procède actuellement à une étude des ressources hydroélectriques du pays. Les résultats obtenus jusqu'ici [2] indiquent, pour les rivières coulant vers l'ouest de la péninsule *a*) un potentiel de 3,7 millions de kilowatts, *b*) de 6,8 millions de kilowatts pour les rivières coulant vers l'est dans le sud du pays, et *c*) de 3,9 millions de kilowatts pour les rivières de l'Inde centrale (bassins des rivières Narbada, Tapti, Mahanadi, Brahmni et Baikrani). Ces calculs sont fondés sur l'étude détaillée des cartes disponibles et sur un facteur de charge hypothétique de 60 pour cent pour les centrales qui pourraient théoriquement être installées en divers points. On a pris pour base des calculs 26 des centrales prévues sur les rivières allant vers l'ouest, 43 sur les rivières allant vers l'est et 36 sur les rivières du centre du pays. Ces 105 centrales seraient disséminées dans le pays au-dessous du vingt-quatrième parallèle.

L'étude détaillée des cours d'eau de l'Himalaya n'est pas encore terminée. Elle comporte trois parties intéressant l'est, le centre et l'ouest de la chaîne de l'Himalaya. On peut raisonnablement évaluer [3] le potentiel hydroélectrique de ces cours d'eau à 20 millions de kilowatts, dont 50 pour cent dans le bassin du Gange et à peu près 20 pour cent dans le bassin de l'Indus, compte tenu de l'eau que requerra l'irrigation.

Le potentiel hydroélectrique global de l'Inde dans son état de développement au 31 décembre 1953 était de 731 000 kilowatts, c'est-à-dire environ 2 pour cent du potentiel estimatif [4]. La répartition par régions de la capacité de production des installations existantes figure au tableau 1.

Les cours d'eau du centre et du sud de l'Inde ne sont pas alimentés par la fonte des neiges, mais par les pluies qui tombent au cours des quatre à six mois de la mousson. C'est la raison pour laquelle l'utilisation de cette force hydraulique pour la production de l'électricité exige la construction de vastes bassins d'accumulation.

Le capital nécessaire pour l'exploitation du potentiel hydroélectrique ne dépasse pas 2 000 roupies par kilowatt et, dans certains cas, il peut même n'être que de 500 roupies par kilowatt. Le coût estimatif des projets actuellement en voie de réalisation et celui des projets que l'on envisage d'inclure dans le deuxième plan quinquennal figurent aux tableaux 2 et 3 respectivement [3]. Ces tableaux démontrent que le coût par kilowatt de puissance installée s'élève en moyenne à quelque 1 200 roupies. La production de l'électricité faisant dans maints cas par-

---

Original : anglais.

* Secrétaire du Département de l'énergie atomique du Gouvernement de l'Inde.

** Les numéros entre crochets renvoient à la bibliographie qui figure à la fin du mémoire.

Tableau 1

Répartition par régions de la puissance installée au 31 décembre 1953 et production pendant l'année 1953

États ou Union d'états	Centrales à vapeur		Centrales à mazout		Centrales hydrauliques		Total	
	kW	10^6 kWh	kW	10^6 kWh	kW	10^6 kWh	kW	10^6 kWh
1. Andhra	23 750	76,03	11 421	8,64	—	—	35 171	84,67
2. Assam	200	—	2 836	5,48	550	2,45	3 586	7,93
3. Bengale occidental	540 701	1 345,27	4 007	4,09	2 760	6,76	547 468	1 356,02
4. Bihar	189 510	206,75	10 612	15,48	4 000	1,76	204 122	223,99
5. Bombay	182 057	846,30	48 435	58,97	281 114	1 207,76	511 606	2 113,03
6. Districts relevant de l'administration centrale :								
a) Delhi	55 150	179,11	7 463	0,65	—	—	62 613	179,76
b) autres régions	4 302	7,17	7 672	12,71	376	0,69	12 350	20,57
7. Hyderabad	22 250	54,90	4 562	5,00	—	—	26 812	59,90
8. Jammu et Cachemire	1 500	1,58	465	0,45	4 514	23,30	6 479	25,33
9. Madhya Bharat	11 459	25,10	6 695	9,08	—	—	18 154	34,18
10. Madhya Pradesh	66 881	138,14	6 552	7,08	—	—	73 433	145,22
11. Madras	77 000	170,93	1 688	4,30	137 950	511,16	216 638	686,39
12. Mysore	—	—	69	0,06	179 200	633,32	179 269	633,38
13. Orissa	5 776	5,19	4 523	3,84	5	—	10 304	9,03
14. P.E.P.S.U	526	0,27	6 000	6,80	240	—	6 766	7,07
15. Pendjab (Inde)	10 400	12,93	13 037	17,14	49 750	164,47	73 187	194,54
16. Rajasthan	25 165	56,53	11 313	10,50	—	—	36 478	67,03
17. Saurashtra	12 000	29,82	14 670	20,35	—	—	26 670	50,17
18. Travancore-Cochin	—	—	4 686	0,88	37 500	190,18	42 186	191,06
19. Uttar Pradesh	165 090	416,71	13 588	18,96	33 220	171,94	211 898	607,61
	1 393 717	3 572,79	180 294	210,54	731 179	2 913,85	2 305 190	6 697,18

Tableau 2

Coût prévu pour quelques grands projets

Désignation du projet	État	Puissance installée prévue en kW	Coût prévu en lakhs [a]	Coût de l'énergie par kWh	Coût par kW installé en roupies
1. Poringal Kuthu (Projet pour la rive droite)	Travancore-Cochin	150 000	1 400	0,19 anna	933
2. Projet Pumba	Travancore-Cochin	240 000	2 075	0,17 anna	865
3. Projet pour la vallée de Sharavathi (2e étape)	Mysore	284 000	2 395	0,17 anna	843
4. Projet Koyna (1re étape)	Bombay	240 000	2 667	0,25 anna	1 110
5. Projet Rihand	Uttar Pradesh	160 000	2 026	0,21 anna	1 267
6. Projet Bhakra-Nangal (avec 4 groupes à Bhakra)	Pendjab	316 000 p. effective : 284 000 à 60 pour cent de taux d'utilisation	2 192	0,19 anna	694
7. Projet Ramganga	Uttar Pradesh	75 000	1 087	0,24 anna	1 449
		1 465 000	13 842		945

[a] Un lakh = 100 000 roupies.

Tableau 3

Coût estimatif de quelques grands projets actuellement à l'étude pour le deuxième plan quinquennal

Désignation du projet	État	Puissance proposée en kW	Coût estimé en lakhs [a]	Coût par kW installé en roupies
1. Projet Yamuna Hydel	Uttar Pradesh	51 000	960	1 882
2. Agrandissement de la centrale thermique de Bokaro	D. V. C. (Bihar & Bengale)	50 000	350	700
3. Ranapratap Sagar Dam (Chambal)	Madhya Bharat & Rajasthan	90 000	1 000	1 111
4. Centrale (2e) de Hirakud . . .	Orissa	72 000	890	1 236
5. Centrale thermique de Khepar-kheda Extensions	Madhya Pradesh	60 000	811	1 352
6. Centrale thermique de Korba	Madhya Pradesh	90 000	854	949
7. Centrale thermique de Katni	Madhya Pradesh	20 000	270	1 350
8. Projet H. E. Tawa	Madhya Pradesh	30 000	513	1 710
9. Projet H. E. Barapole	Coorg	139 000	2 036	1 465
10. Projet H. E. Kundah	Madras	129 000	2 356	1 826
11. Extensions Machkund de 2e étape	Andhra	51 000	268	526
12. Projet H. E. Laxmi	Travancore-Cochin	54 000	490	908
13. Projet H. E. Sholayar	Travancore-Cochin	54 000	392	726
14. Projet H. E. Panniar	Travancore-Cochin	25 000	295	1 180
		915 000	11 485	1 255

[a] Un lakh = 100 000 roupies.

tie d'un projet à plusieurs fins et représentant une proportion considérable du coût du projet dans son ensemble, y compris les frais de construction des réservoirs figurant sous la rubrique « irrigation », les immobilisations globales que comporte la mise sur pied de tout projet sont considérablement plus élevées que ne semblent l'indiquer les chiffres précités. Le coût de l'électricité par unité, d'après les mêmes critères, oscille entre 0,17 et 0,44 anna par unité (kilowattheure) *.

Charbon

La Commission pour la conservation du charbon métallurgique estimait en 1949 à 2 780 millions de tonnes les réserves de charbon à coke de l'Inde et à quelque 39 650 millions de tonnes [5] celles de charbon à vapeur et de charbon non cokéfiable. On présume que la région sud de l'état de Madras et l'ouest de Cutch possèdent en outre une réserve d'environ 2 000 millions de tonnes de lignite. Il est intéressant de comparer ces chiffres à celui de la réserve des États-Unis d'Amérique, estimée à 2 254 milliards de tonnes, aux 172 milliards de tonnes de réserve du Royaume-Uni et aux 1 011 milliards de tonnes de réserve de la Chine [6]. La valeur thermique du charbon indien oscille entre 5 000 Btu (unités thermiques britanniques) et 12 500 Btu par livre (entre 1 250 et 3 000 kilocalories pour 450 g).

Les principales régions productrices de charbon sont la province de Bihar et le Bengale d'où proviennent plus de 80 pour cent de la production courante. D'autres régions productrices sont Madhya Pradesh, Vindhya Pradesh, Hyderabad, Orissa et Assam. Il se trouve aussi du charbon près de Bikaner dans l'état de Rajahsthan et au Cachemire, mais la production actuelle est très faible [8]. La répartition des gisements de charbon est indiquée à la carte des minéraux de l'Inde qui figure à l'annexe 1 [9].

Les prix du charbon de l'Inde à la mine varient entre 10 et 16 roupies, ceux du coke entre 21 et 25 roupies par tonne selon la qualité. Le transport ajoute à ce prix de 0,35 à 0,7 anna par mille et par tonne, de sorte que dans les parties éloignées des gisements, le charbon revient à 35 roupies par tonne ou davantage [3, 10].

En 1952-1953, sur les quelque 36 millions de tonnes de la production [3], on n'en a acheminé que 31,7 millions. Il faut noter, à ce propos, que les chiffres de production, pour l'année 1951, aux États-Unis et au Royaume-Uni, étaient d'environ 470 et 203 millions de tonnes respectivement [11].

Uranium et thorium

Les réserves de l'Inde en uranium et en thorium font l'objet d'un exposé préparé par M. D. N. Wadia à l'intention de la présente Conférence [12].

Les gisements de minerai d'uranium connus, contenant plus de 0,1 pour cent d'uranium, ont une teneur en uranium totale d'environ 15 000 tonnes, alors que des quantités d'uranium beaucoup plus importantes se trouvent dans les minerais d'une

* Une roupie = 16 annas = 1 shilling 6 pence (R.-U.) = 21 cents des États-Unis d'Amérique.

concentration plus faible. Ce n'est qu'en 1949 que l'on a procédé pour la première fois à une prospection systématique de l'uranium dans le pays; et l'an dernier seulement, on a commencé à faire des relevés au moyen d'hélicoptères et d'avions munis de scintillomètres qui ont permis de découvrir quelques nouveaux gisements radioactifs. Un parc de jeeps également pourvues de scintillomètres est actuellement utilisé pour étendre la zone explorée par les équipes de géologues. Il est à prévoir que, dans un pays aussi riche que l'Inde en formations géologiques minérales, on découvrira de plus importantes ressources d'uranium, mais il est prudent, en attendant la confirmation de ces hypothèses, de baser les calculs uniquement sur les ressources connues.

On connaît depuis longtemps d'importants gisements de monazite contenant de 8 à 10 pour cent de thorium, et de nouveaux gisements ont récemment été découverts. L'on estime qu'à eux seuls les gisements connus contiennent de 150 000 à 180 000 tonnes de thorium sous une forme facile à extraire [12].

Pétrole

On trouve du pétrole à Digboi, dans l'Assam, où la production s'élève à 60 millions de gallons (environ 273 000 m³) par an, c'est-à-dire à environ 7 pour cent de la consommation globale de l'Inde [13]. On a certaines raisons de penser qu'il existe des gisements de pétrole à l'est du Bengale occidental et à l'ouest près de Cutch. Il n'existe toutefois aucune évaluation précise et sûre des réserves de pétrole.

Bois de feu, charbon de bois et déchets agricoles

La combustion de bois et de déchets agricoles, tels que les bouses desséchées, représente une proportion considérable de la consommation d'énergie dans l'Inde, et il est difficile d'en évaluer la quantité avec quelque exactitude. On estime qu'en 1950-1951 le bois de feu et le bois à charbon tirés des forêts domaniales représentaient environ 400 millions de pieds cubes [14] auxquels il convient d'ajouter au moins 33 pour cent pour la coupe illicite et le bois tiré des propriétés privées. On estime qu'en 1951 quelque 224 millions de tonnes de déchets agricoles (poids sec) ont été employées comme combustible [15]. Les chiffres pour 1953 ne diffèrent probablement pas beaucoup de ceux-là. Ainsi que nous le verrons au chapitre suivant, ce combustible représente une proportion considérable de la consommation actuelle d'énergie. Ce n'est toutefois pas une réserve susceptible d'augmenter et le rôle qu'elle joue dans la production d'énergie deviendra insignifiant à mesure que la consommation d'énergie augmentera.

Énergie solaire

On estime qu'en Inde la terre reçoit du soleil environ un kilowatt d'énergie par yard carré (environ 0,83 m²) pendant les heures d'insolation. Étant donné que, pendant huit mois de l'année à peu près, le ciel est clair dans la plus grande partie du pays, la quantité d'énergie solaire disponible est énorme. Toutefois, les techniques d'exploitation ne sont pas encore au point et, dans les conditions actuelles, il semble que sa transformation en énergie électrique entraînerait des investissements tels qu'elle ne serait pas rentable. Les limites de l'efficacité de la conversion de la chaleur en travail mécanique ont été fixées par le fameux cycle de Carnot; ce principe rend, dans le cas présent, la conversion inefficace, du fait de la basse température à laquelle la chaleur peut être obtenue. Mais cette limitation n'entre pas en jeu lorsqu'on utilise la chaleur pour élever la température d'une autre chaleur, de sorte que l'utilisation de l'énergie solaire pour la climatisation offre, en théorie, des possibilités intéressantes. Étant donné que la climatisation d'un local d'une superficie de 100 yards carrés (environ 83 m²) et d'une hauteur moyenne de 10 à 12 pieds (de 3 m à 3,65 m environ) exige environ 7 kilowatts d'énergie, c'est-à-dire environ 0,07 kilowatt par yard carré, il est évident que l'énergie solaire rayonnant sur le toit d'une maison d'un étage permettrait sa climatisation même si l'efficacité de la conversion était inférieure à 10 pour cent. Dans certaines régions, la climatisation augmenterait le rendement, le confort et la santé du travailleur pendant neuf à douze mois de l'année; dans d'autres, pendant six mois. Lorsque le niveau de vie de notre pays sera plus élevé, la climatisation des locaux sera probablement considérée comme aussi nécessaire à l'obtention d'un confort raisonnable que l'est le chauffage dans les pays froids, et l'énergie qu'exigera cette climatisation sera considérable. Il est donc à prévoir que l'énergie solaire, en tant que moyen de climatisation, représentera une grande partie de la consommation globale d'énergie.

II. — CONSOMMATION D'ÉNERGIE

La puissance installée de l'Inde est indiquée dans le tableau ci-dessous, ainsi que les apports respectifs du charbon, de l'énergie hydraulique et du pétrole [4].

Tableau 4

Puissance des installations génératrices d'électricité

(Chiffres en kilowatts au 1er janvier de chaque année)

Année	Vapeur	Énergie hydraulique	Diesel	Total
1951 . .	1 004 434	559 285	148 796	1 712 515
1952 . .	1 097 567	575 179	162 880	1 846 672
1953 . .	1 176 317	715 179	170 250	2 061 755
1954 . .	1 393 717	731 179	180 294	2 305 190

Ainsi, à la fin de l'année 1953, la puissance installée était de 2,3 millions de kilowatts au total et la production annuelle, de 6 697 000 milliards de kilowattheures, dont 3 573 000 milliards provenaient

Tableau 5

Consommation totale d'énergie

	1953 Inde		Putnam pour 1947		
			Inde	Royaume-Uni	U. S. A.
	10^9 kWh	10^{15} Btu[a]		10^{15} Btu[a]	
Charbon	239	817	868	5 807	15 852
Force hydroélectrique	3	10	—	4	286
Pétrole	43	147	89	559	15 735
Bois	23	78	134	—	1 780
Déchets agricoles	1 000	3 412	3 002	—	—
TOTAL	1 308	4 464	4 093	6 370	33 653

[a] 1 Btu équivaut à environ 0,252 kilocalorie.

des usines à vapeur et 2 914 000 milliards des usines hydroélectriques [4]. Le prix moyen de la vente s'établissait à 1,084 anna par kilowatt. La vente aux particuliers et aux établissements commerciaux rapportait en moyenne 2,645 annas par kilowatt tandis que la vente à l'industrie, à l'agriculture et à la traction rapportait 0,754 anna par kilowatt. Le tableau 5 évalue la consommation totale d'énergie dans l'Inde en 1953. Les calculs sont basés sur les chiffres donnés antérieurement avec les facteurs de conversion suivants : charbon, 11 500 Btu par livre (environ 3 000 kilocalories par 450 g); dérivés du pétrole, 44,7 kWh le gallon (environ 4,54 l); bois de feu, 43,7 kWh le pied cube (environ 28,3 l); déchets agricoles, 4 470 kWh la tonne.

Les évaluations de P. C. Putnam [16] pour l'année 1947 sont données ici à titre de comparaison. On verra que sur un total de 1 300 milliards de kilowattheures, 1 000 milliards, c'est-à-dire environ 75 pour cent, provenaient de la combustion des déchets agricoles. Si l'on estime à 370 millions la population totale de l'Inde, la consommation annuelle d'énergie par personne pour 1953 était de 3 570 kilowattheures, c'est-à-dire l'équivalent d'environ 0,47 tonne de charbon par an et par personne. On peut comparer ces chiffres aux chiffres correspondants de 9 et 5 tonnes de charbon par an et par personne aux États-Unis et au Royaume-Uni respectivement [16].

Dans les pays industriellement développés, on dispose, en ce qui concerne la puissance installée et la consommation d'énergie, de chiffres qui permettent de prévoir le développement futur avec quelque précision. Pour l'Inde, ces données n'existent pas, notre pays venant seulement de mettre sur pied un programme d'industrialisation intensive.

Dans les pays industriellement développés, la puissance installée double à peu près tous les dix ans. Le rythme du développement dans l'Inde, bien que plus lent pour le passé, a marqué un accroissement de 56 pour cent pour la décennie de 1941 à 1950 [4]. Pendant la période du premier Plan quinquennal (1951-1956) l'accroissement [3] sera de 60 pour cent, ce qui correspond approximativement à un accroissement de 250 pour cent pour une période de dix ans. On prévoit que la puissance doublera pendant la période du deuxième plan quinquennal (1956-1961). L'accroissement de cette puissance au cours de trente années prochaines a, en conséquence, été évalué par la Division pour le développement des ressources naturelles de la Commission du plan [3] en partant de l'hypothèse que la puissance des centrales électriques de l'État s'accroîtrait à la cadence suivante :

Période	*Période de doublement*
Deuxième plan quinquennal	5 ans
Troisième plan quinquennal	6 »
Quatrième plan quinquennal	8 »
Cinquième lustre et suivants	10 »

L'accroissement de la puissance installée globale du pays, calculé sur la base de cette hypothèse, figure au tableau 6 [3].

Tableau 6

Puissance installée des centrales électriques

Puissance installée	En millions de kilowatts
En mars 1956	3,5
En mars 1961	7
En mars 1966	12
En mars 1976	25
En mars 1986	50

Le Ministère de la production [17] estime par ailleurs que la production de charbon s'accroîtra à la cadence suivante au cours de la période du deuxième Plan quinquennal :

Année	*En millions de tonnes*	*Année*	*En millions de tonnes*
1955	44	1958	54
1956	47	1959	57
1957	49	1960	60

Même en supposant que la production de charbon atteigne le chiffre de 360 millions de tonnes par an en 1986, ce qui signifierait qu'elle aurait doublé tous les dix ans pendant trente ans, il faudrait plus

de cent ans pour épuiser les réserves de charbon connues. Ces réserves paraissent donc suffire, en principe, à l'industrialisation du pays *à la cadence maximum que l'on peut estimer possible au cours des prochaines décennies.*

III. — BESOINS FUTURS EN ÉNERGIE ÉLECTRONUCLÉAIRE

Le tableau 5, indique qu'en doublant la production de charbon de 1953, on n'accroîtrait la consommation totale d'énergie que de quelque 20 pour cent. Mais si la puissance hydroélectrique installée devait passer de 0,72 million de kilowatts (production de 1953) au maximum de 35 millions de kilowatts, le chiffre 3 qui figure dans la première colonne du tableau 5 s'élèverait à 145. Toutefois, même exploité en totalité, le potentiel hydroélectrique de l'Inde ne produirait guère que le septième de l'énergie que l'on obtient par la combustion des bouses desséchées. Le même tableau indique que, pour doubler la consommation totale d'énergie, il faudrait multiplier par six la production de charbon de 1953, c'est-à-dire arriver à produire environ 216 millions de tonnes par an.

Le problème peut être abordé d'une autre manière. Si l'on part de l'hypothèse que la population totale du pays se stabilise à 400 millions d'habitants, hypothèse qui, à l'heure actuelle, ne peut être considérée que comme une pieuse espérance, les réserves de charbon indiquées représenteraient seulement un peu moins de 100 tonnes par personne, chiffre qui ne soutient pas la comparaison avec ceux d'autres pays : 15 000 tonnes par personne aux États-Unis, 3 400 tonnes par personne au Royaume-Uni et 2 200 tonnes par personne en Chine [7].

Ainsi que nous l'avons déjà mentionné, la consommation totale d'énergie par personne aux États-Unis équivaut à la combustion d'environ 9 tonnes de charbon par personne et par an. *Le même taux de consommation par personne dans l'Inde — en supposant que ce pays ait une population de 400 millions d'habitants* — correspondrait à la combustion de plus de 3 600 millions de tonnes de charbon par an, et aurait pour effet *d'épuiser en dix ans environ toutes les réserves de charbon du pays.* L'utilisation du potentiel hydroélectrique de 35 millions de kilowatts changerait peu de chose à ces calculs, puisqu'une puissance hydroélectrique installée de 35 millions de kilowatts correspond à la combustion annuelle d'environ 90 millions de tonnes de charbon. *Nous en venons ainsi à l'inévitable conclusion que les ressources de force hydroélectrique et de combustibles classiques de l'Inde sont insuffisantes pour permettre à ce pays d'atteindre un niveau de vie aussi élevé que celui des États-Unis à l'heure actuelle.*

L'on sait que la seule matière fissile existant à l'état naturel est l'uranium-235 qui se trouve dans la proportion de 0,7 pour cent dans l'uranium naturel; si aucune partie de l'uranium inerte n'est convertie en matière fissile, une tonne d'uranium naturel produira une énergie équivalant à environ 21 000 tonnes de charbon. Les réserves d'uranium de l'Inde dont l'existence est déjà connue ne produiraient donc qu'une énergie à peu près égale à celle de 315 millions de tonnes de charbon, ce qui ne modifierait en rien nos conclusions antérieures.

Mais dans les considérations que nous venons d'énoncer, nous sous-estimons fortement l'équivalent en énergie de nos réserves atomiques, car nous ne tenons pas compte du fait qu'au cours de la libération de l'énergie nucléaire, les matières fertiles (l'uranium-238 et le thorium) sont susceptibles de se transformer en matières fissiles, respectivement en plutonium et en uranium-233. Pour une pile fonctionnant avec de l'uranium naturel, on peut admettre qu'en moyenne la nouvelle matière fissile produite équivaut à 80 pour cent de la matière fissile consumée. L'énergie totale libérée par une tonne d'uranium naturel n'est donc multipliée que par 5, ce qui à la longue ne modifierait pas non plus de manière appréciable la situation en ce qui concerne l'énergie; il est donc absolument nécessaire de créer des centrales atomiques qui puissent produire des matières fissiles en quantité au moins égale à celle des matières consumées. Au stade actuel de nos connaissances techniques, pour parvenir à un tel résultat, il faut d'abord se procurer du combustible nucléaire pur ou enrichi, extrait de l'uranium naturel dans une usine de diffusion gazeuse, ou produit par l'uranium naturel ou le thorium dans des génératrices nucléaires destinées à fonctionner avec de l'uranium naturel et à provoquer cette transformation. Comme l'Inde voudrait éviter de construire une usine de diffusion gazeuse, il est évidemment nécessaire de créer, au stade initial, des centrales électronucléaires fonctionnant avec de l'uranium naturel et transformant une quantité maximum de matières fertiles en matières fissiles. Cette matière pure ou enrichie pourrait ensuite être utilisée par des centrales, ce qui nous permettrait d'exploiter la totalité de nos réserves d'uranium et de thorium pour la production d'énergie. Sur cette base, la réserve d'uranium et de thorium déjà mentionnée équivaut à 600 milliards de tonnes de charbon, c'est-à-dire plus de quinze fois la totalité des réserves de charbon dont on a connaissance en Inde. L'énergie atomique modifie donc et améliore considérablement la situation.

La régénération ne ferait que multiplier par 15 la durée de la période dont nous avons parlé; mais on peut faire une prévision beaucoup plus encourageante : longtemps avant que se déclare une crise du combustible, peut-être même au cours des vingt prochaines années, la technique aura sans doute progressé à tel point que l'on pourra, sans modifier la ligne générale du processus, obtenir l'énergie par la fusion plutôt que par la fission. A ce moment-là, le problème que pose l'énergie à l'échelon mondial aura été résolu à toutes fins pratiques et pour une période indéfinie, car le combustible deviendra aussi abondant que l'hydrogène lourd dans l'eau des mers.

IV. — POSSIBILITÉS ÉCONOMIQUES OFFERTES DANS L'IMMÉDIAT PAR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE EN INDE

Le coût de l'équipement d'une centrale électronucléaire et le prix de revient de l'électricité produite par une telle centrale ont été supputés par plusieurs experts. Toutefois, on ne peut pas considérer que la discussion soit très avancée, car contrairement à ce qui se passe pour les centrales d'énergie thermique, il existe, pour la construction des centrales électronucléaires, au moins une demi-douzaine de plans fondamentalement différents les uns des autres et qu'il faudra expérimenter au cours des prochaines années pour obtenir des données comparables quant à leur valeur économique. Le problème économique que pose une centrale électronucléaire se complique encore du fait de la conversion de la matière fertile en matière fissile et de la nécessité de réintroduire dans le cycle, par un processus chimique, le combustible utilisé aussi bien que la matière fertile. Notre propos n'est pas de discuter ici ce problème complexe, mais bien d'étudier les possibilités économiques offertes à l'Inde au cours des prochaines décennies par la production d'électricité au moyen de l'énergie atomique. A cet effet, nous supposons un chiffre vraisemblable pour le coût de l'équipement des centrales électronucléaires et pour le coût du kilowattheure de l'électricité produite. Le coût de l'équipement par kilowatt de puissance installée, dans une centrale de ce genre, décroît naturellement à mesure que la centrale s'accroît. Le rapport entre le coût et l'importance de l'entreprise n'est guère connu, mais, aux fins de la discussion, nous supposons que l'énergie peut être livrée au prix de 0,5 anna (6,6 millièmes de dollar, par kilowattheure par une génératrice nucléaire d'une puissance de production de 50 000 kilowatts ou plus *. Pour le coût de l'équipement, nous pensons qu'il deviendra possible d'installer une centrale électronucléaire de 100 000 kilowatts pour 20 crores de roupies [18] **, ce qui est environ 65 pour cent de plus que le coût d'une centrale thermique ordinaire de même importance.

Le coût estimatif de la mise sur pied de plusieurs projets d'installations hydroélectriques et le coût approximatif de l'électricité produite par ces installations sont indiqués aux tableaux 2 et 3; mais il existe dans l'Inde des régions éloignées de toute source potentielle ou effective d'énergie hydroélectrique. Il va de soi que, partout où l'énergie est nécessaire et où il est possible d'en produire par la force hydraulique, cette méthode doit être adoptée de préférence à toute autre.

Cette conclusion appelle toutefois deux observations correctives. Les projets hydroélectriques exigent généralement la construction de grands barrages et d'autres ouvrages d'art de grande envergure qui représentent des années de travail. Par conséquent, le facteur temps peut justifier, dans une région à court de force motrice, la construction de centrales thermiques, même si en fin de compte le coût de l'électricité doit être plus élevé.

En second lieu, le coût de l'équipement d'une centrale hydroélectrique peut être dans la pratique considérablement plus élevé que ne l'indiquent les chiffres des tableaux 2 et 3. En effet, théoriquement, une grande partie, sinon la plus grande, de la dépense occasionnée par les travaux d'art que comporte la réalisation d'un projet à plusieurs fins, est imputée au poste irrigation. Mais dès l'instant où il faut trouver les fonds nécessaires à la réalisation du projet complet, et à moins que le programme de planification nationale ne donne la priorité à de fortes immobilisations pour ce plan particulier, l'installation d'une centrale hydroélectrique se révèle trop coûteuse et il est nécessaire, pour faire face aux besoins les plus pressants, de se résoudre à installer une centrale thermique.

Dans de nombreuses régions et centres industriels de l'Inde, tels qu'Ahmedabad et Madras, on a même trouvé avantageux de produire l'électricité dans des centrales thermiques, en dépit du fait que le charbon nécessaire devait être transporté sur plusieurs centaines de kilomètres, et bien qu'il y eût, dans le voisinage, un potentiel hydroélectrique qui aurait pu être exploité. La ville de Bombay est un autre exemple de ce que nous venons de dire : la pénurie de force motrice y est si grande qu'elle a justifié l'installation d'une usine thermique de 100 000 kW, malgré l'existence d'un potentiel hydroélectrique considérable qui, avec le temps, sera aussi exploité.

Le coût de production de l'électricité produite par usine thermique, dans certains centres industriels de l'Inde occidentale, est de 0,65 anna par kilowattheure, alors que dans certains centres du sud-est de l'Inde ce coût s'élève jusqu'à 1,2 anna le kilowattheure [3]. L'on estime que le coût d'un kilowatt provenant d'usine thermique oscille entre 0,39 et 0,55 anna selon le prix du charbon, le second chiffre étant celui des centrales où le prix du charbon qui doit être transporté sur de longues distances s'élève à 35 roupies la tonne. Il s'ensuit que, dans les endroits éloignés des gisements de charbon, et où, pour une raison ou une autre, on estime à propos d'installer une centrale thermique, une centrale nucléaire qui pourrait produire de l'électricité à 0,5 anna le kilowattheure pourrait affronter la concurrence.

Ainsi que nous l'avons indiqué, on estime que le coût de l'équipement d'une centrale électronucléaire, à l'heure actuelle, serait sensiblement plus élevé que celui d'une centrale thermique classique de même puissance. Il pourrait néanmoins se révéler préférable d'installer une centrale électronucléaire, afin d'éviter les nouvelles charges que le transport du charbon nécessaire à l'usine thermique entraî-

* Le livre blanc britannique *A Programme of Nuclear Power* indique 0,6 penny par kilowatt comme prix de revient probable.

** 1 crore = 10 millions de roupies. 20 crores de roupies = 200 millions de roupies = 15 millions de livres sterling.

nerait immédiatement pour le réseau ferroviaire. La Commission d'enquête sur l'utilisation rationnelle du combustible dans les chemins de fer déclare que « si le développement industriel se poursuit, la demande de charbon s'accroîtra et les approvisionnements, ainsi que nous l'avons fait remarquer, sont, à l'heure actuelle, gravement entravés par l'insuffisance des moyens de transport. Il est donc nécessaire, non seulement d'accroître la production du charbon à l'échelon régional, *mais aussi d'étendre et de développer les transports ferroviaires.* Le développement des transports ferroviaires exigera une augmentation de la force motrice, du matériel roulant, du volume du trafic, et une plus grande quantité de charbon [8]. » En vue d'améliorer la situation, des dispositions ont déjà été prises à l'échelon régional pour réglementer l'expédition du charbon des différentes mines aux diverses régions de l'Inde [8]. Il est donc évident que toute augmentation appréciable de la puissance thermique dans les centres éloignés des mines de charbon nécessiterait de fortes immobilisations de capitaux pour développer les réseaux ferroviaires et le matériel roulant. Ainsi, les immobilisations supplémentaires requises par une centrale électronucléaire seront compensées par le fait qu'il ne sera plus nécessaire d'immobiliser des capitaux pour accroître les moyens de transport indispensables à une centrale électrique alimentée au charbon. Sans doute cette considération varierat-elle selon les régions : la mesure dans laquelle elle est valable constitue un problème qu'il y aura lieu d'étudier de façon plus approfondie. Des études de cette nature ont été entreprises par le Département de l'énergie atomique avec l'assistance de la Commission du plan et des ministères intéressés.

On peut supposer que le coût du combustible d'une centrale électronucléaire ne dépasserait pas 0,01 anna par kilowatt; le prix de revient, évalué à 0,5 anna par kilowatt d'électricité, est donc en grande partie constitué par les frais d'équipement. Les centrales électronucléaires, parvenues à un plus haut degré de perfectionnement, travailleront à une cadence plus rapide et à des températures plus élevées, ce qui aura pour effet de réduire sensiblement le rapport $\frac{\text{capital}}{\text{kilowatt}}$ de la puissance installée et, en conséquence, le prix de revient du kilowattheure. Ces centrales auront vraisemblablement besoin de combustible enrichi et, afin d'en obtenir en quantités importantes, il faudra forcément construire, au cours des prochaines années, plusieurs centrales électronucléaires qui fonctionneront avec de l'uranium naturel et produiront non seulement de l'énergie utile, mais aussi du plutonium ou de l'uranium-233. Du point de vue économique, il est essentiel que ces premières centrales électronucléaires soient situées dans des lieux éloignés des réserves de charbon et où la demande d'énergie est urgente, même si leur installation est plus coûteuse que celle de centrales thermiques de même puissance, compte tenu des frais supplémentaires qu'occasionnent à ces dernières les transports ferroviaires.

RÉSUMÉ

Les conclusions provisoires que l'on peut tirer de ce qui précède sont résumées ci-après :

1. Les réserves connues de charbon et d'énergie hydroélectrique de l'Inde suffiront à l'industrialisation du pays pendant les prochaines décennies, même si cette industrialisation s'effectue à la cadence maximum estimée réalisable.

2. Elles ne suffiront pas à maintenir, pendant plus de deux ou trois décennies, un niveau de vie égal à celui auquel sont parvenus les pays dont le développement industriel est aujourd'hui le plus avancé.

3. Les réserves connues d'uranium et de thorium de l'Inde représentent un potentiel d'énergie plus de 15 fois supérieur à celui des réserves de charbon.

4. Étant donné que les réserves de charbon se trouvent concentrées dans quelques régions, le coût de production de l'énergie électrique à partir des usines thermiques classiques varie de 0,5 anna à 1,2 anna le kilowattheure dans les centres industriels éloignés des gisements de charbon. Dans ces régions-là, l'énergie électrique provenant des centrales électronucléaires pourrait concurrencer celle des usines thermiques.

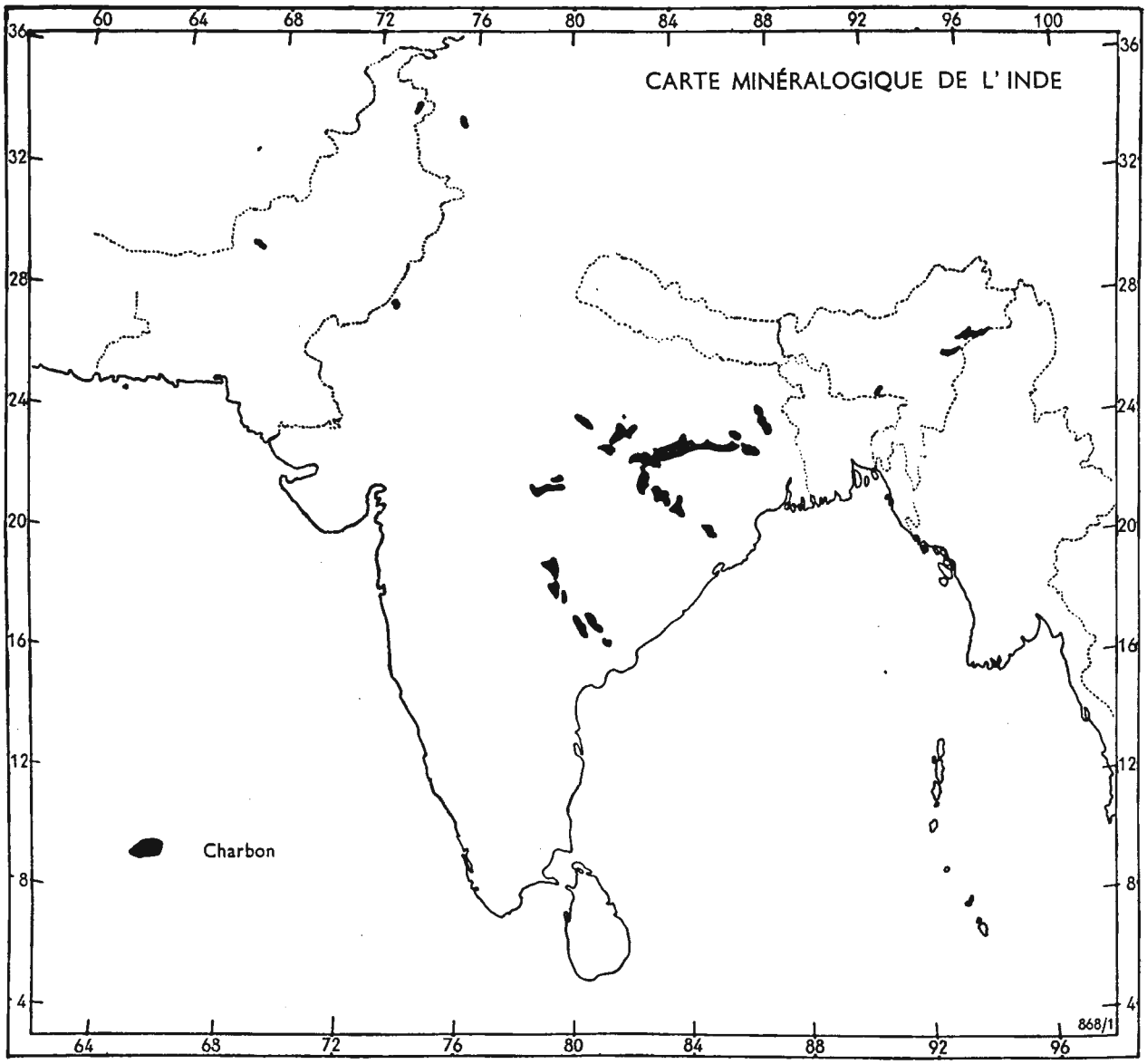
5. Le coût élevé de l'installation de centrales électronucléaires dans des régions judicieusement choisies serait, dans une grande mesure, sinon entièrement, compensé par les immobilisations que nécessiterait l'extension du réseau ferroviaire pour permettre la création de nouvelles centrales thermiques classiques, création actuellement impossible du fait de la surcharge des moyens de transport.

6. La nécessité de se procurer du combustible nucléaire enrichi ou pur (plutonium ou uranium-233) pour les futures centrales électronucléaires d'une structure plus complexe rendra indispensable la création, au cours des prochaines décennies, de quelques centrales produisant simultanément les matières en question et de l'énergie électrique. Ces usines, pour être plus rentables, devraient être situées loin des dépôts de charbon et dans des régions où il existe une urgente demande d'énergie à laquelle les ressources hydroélectriques ne sauraient suffire à temps.

Remerciements

Une grande partie des renseignements de cet exposé m'ont été fournis par la Commission du plan. Aussi voudrais-je exprimer ici à cette Commission, et en particulier à sa Division pour le développement des ressources naturelles, ma gratitude pour l'aide que j'en ai reçue. Je tiens aussi à remercier la Commission centrale des eaux et de l'énergie et le Ministère de l'alimentation et de l'agriculture qui m'ont procuré des renseignements inédits et qui m'ont également prêté leur concours. Enfin, je voudrais dire ma reconnaissance à M. S. Patuck, du Département de l'énergie atomique, qui m'a aidé à rassembler la documentation nécessaire à la préparation de cet exposé.

ANNEXE



BIBLIOGRAPHIE

1. Planning Commission, *Five Year Plan*, 340 (1952).
2. Central Water and Power Commission, *Hydro-electric Survey of India*, volumes I (1953), II (1954) et III (1954). Inédit.
3. Renseignements inédits communiqués par la Commission du plan (1955).
4. Central Water and Power Commission, *Public Electricity Supply All India Statistics, 1953*, Government of India Press (1955).
5. *Report of the Working Party for the Coal Industry*, 17-19 et 146-150, Government of India Press (1951).
6. *U. S. Geological Survey Circular 94* (1950).
7. Harrison Brown, *The Challenge of Man's Future*, Martin Secker Warburg Ltd., Londres (1954).
8. Office of the Coal Commissioner, Ministry of Production, *Regional Supply of Coal* (1954).
9. Wadia D. N., *The Geology of India* (1953), Macmillan, Londres.
10. Indian Railway Conference Association, *Goods Tariff No. 29, 36* (1954).
11. U. S. Department of the Interior, Bureau of Mines, *Minerals Year Book, 1951*, Washington (1954).
12. Wadia D. N., *Richesses naturelles de l'Inde en uranium et en thorium*, voir le mémoire P/875, Actes de la présente Conférence, vol. VI, séance 6 B.
13. Planning Commission, *Five Year Plan*, 382 (1952).
14. Government of India, *Statistical Abstract of India 1951-52*, 486 (1955).
15. Renseignements communiqués par le Ministère de l'alimentation et de l'agriculture, et basés sur le recensement du bétail en Inde en 1951.
16. Putnam P. C., *Energy in the Future*, Macmillan & Co., Londres (1954).
17. Production Ministry, *Coal, Second Five Year Plan* (1955). Inédit.
18. *A Programme of Nuclear Power*, Her Majesty's Stationery Office, Londres (1955).

Le plan brésilien d'électrification et les possibilités offertes par l'énergie atomique

par E. Motta Rezende *

Après la deuxième guerre mondiale, le Brésil a dû faire face à une pénurie générale d'électricité. La situation du commerce international a ralenti le développement du réseau électrique existant et obligé les pouvoirs publics à ajourner la construction de nouveaux réseaux; en même temps, le pays poursuivait son industrialisation à un rythme sans précédent, sa population augmentait, et la demande d'électricité ne cessait de s'accroître.

La crise a surtout frappé les régions les mieux développées du pays, mais, pratiquement, ses effets se sont fait sentir partout. Il fallut rationner le courant électrique et repousser à des temps meilleurs la création d'entreprises utiles et rentables.

Des mesures très importantes ont été prises pour améliorer la production d'énergie électrique; les gouvernements des états, les municipalités et les autorités fédérales ont, après accord avec les sociétés privées, établi des plans en vue de doubler la capacité des centrales existantes entre 1953 et 1957; des centrales ont été agrandies, de nouvelles centrales ont été construites et des lignes de transport et de distribution ont été installées. Quelques états, complétant l'effort des compagnies privées, exploitent déjà des centrales d'importance moyenne, et le Gouvernement fédéral est également intervenu; parmi diverses réalisations, il convient de citer spécialement la centrale de Paulo Afonso, qui produit déjà 180 000 kW et transmet de l'énergie sur plus de 800 km de lignes à 220 kV.

Le Gouvernement fédéral a examiné attentivement le problème et, en 1953 et 1954, le Congrès a été saisi d'une série de projets de lois très importants portant institution : d'une taxe générale sur l'électricité; d'un fonds fédéral pour l'électrification; d'un plan national d'électrification; et de la compagnie « Eletrobrás ».

Le produit de la taxe générale sur l'électricité, réparti entre le Gouvernement fédéral et les municipalités, doit leur permettre d'améliorer les conditions de distribution; la part attribuée au Gouvernement fédéral contribuera à la formation du fonds fédéral d'électrification, qui recevra en outre des ressources complémentaires. Les modalités d'utilisation de ce fonds seront fixées dans le plan national d'électrification, et c'est l'Eletrobrás, compagnie mixte constituée à l'aide de capitaux publics et privés, qui sera chargée de le gérer.

Le Congrès a déjà approuvé les dispositions législatives instituant la taxe générale et le fonds fédéral d'électrification **. Les projets de loi portant création du plan national d'électrification et de l'Eletrobrás sont toujours en cours d'examen.

La présente communication a pour objet de décrire les principaux aspects de la politique adoptée par le Gouvernement brésilien en vue de développer la production d'énergie électrique, de donner une idée générale de la situation actuelle et d'indiquer dans quelles régions l'énergie atomique peut être utilisée avec profit.

LA TAXE GÉNÉRALE SUR L'ÉLECTRICITÉ

La loi nº 2308 ** qui a institué la taxe générale sur l'électricité et le fonds fédéral d'électrification, a fixé les modalités de répartition du produit de la taxe.

La taxe sera payée chaque mois par les consommateurs selon le barème suivant : 0,20 cruzeiro par kilowattheure, pour les consommateurs de lumière ***; 0,10 cruzeiro par kilowattheure, pour les consommateurs de force ***; 5 pour cent des dépenses mensuelles, lorsque le consommateur n'utilise pas de compteur (fourniture à forfait).

Original : anglais.

* Professeur d'électrotechnique générale à l'École nationale de mécanique et Directeur de l'Institut d'électrotechnique, Université du Brésil, Rio de Janeiro, D. F., Brésil.

** Loi nº 2308, du 31 août 1954, *Diario Oficial*, 4 septembre 1954. p. 15081, Imprensa Nacional, Rio de Janeiro.

Cette loi « institue le fonds fédéral pour l'électrification, crée un impôt unique sur l'énergie électrique et modifie la législation relative à l'impôt de consommation et à d'autres impôts ».

*** Le Brésil applique actuellement un système de taux de change multiples, dont certains présentent des différences marquées par rapport aux autres. Le « taux officiel », par exemple, est d'environ 20 cruzeiros par dollar des États-Unis. De ce fait, pour toute opération effectuée en monnaie étrangère, il faut prendre en considération le taux spécifique de cette opération.

La loi prévoit que les industries où l'énergie électrique représente une part importante des coûts de production (notamment l'industrie chimique) bénéficieront d'abattements. La taxe sera ramenée à 50 pour cent de son montant lorsque le courant électrique représente de 5 à 10 pour cent de ces coûts, à 30 pour cent de son montant lorsqu'il en représente de 10 à 15 pour cent, et à 10 pour cent de son montant lorsqu'il entre pour plus de 15 pour cent dans le coût de production.

Les fournitures d'électricité ne sont pas assujetties au paiement de la taxe dans les cas suivants : *a*) lorsque le courant est utilisé par des compagnies produisant et distribuant de l'énergie; *b*) lorsqu'il est fourni par des compagnies productrices à des compagnies distributrices; *c*) lorsqu'il constitue la force motrice des transports électrifiés (chemins de fer, etc.); *d*) lorsque la consommation est inférieure à 20 kWh par mois.

Le Gouvernement recevra 40 pour cent du produit de la taxe sur l'électricité; le solde (60 pour cent) sera réparti entre les états, le District fédéral et les municipalités qui l'utiliseront pour améliorer leur système de production, de transport et de distribution.

Ces 60 pour cent seront répartis dans les proportions suivantes :

	Pour cent
Production	1
Superficie	4
Consommation	45
Population	50

En 1952, 10 028 520 MWh au total ont été fournis aux différents consommateurs brésiliens *; on peut estimer que 70 pour cent de ce total sont effectivement passibles de la taxe, et que les recettes à ce titre se sont élevées à environ un milliard de cruzeiros.

La capacité de production installée du Brésil aura presque doublé en 1957; ainsi, on peut estimer qu'au cours des prochaines années le produit annuel de la taxe s'élèvera à près de deux milliards de cruzeiros.

Il est probable que ce chiffre continuera d'augmenter sensiblement en raison des travaux entrepris dans le cadre du plan national d'électrification **.

Eu égard à la dévaluation du cruzeiro, le critère adopté pour l'institution de la taxe peut appeler des critiques. Il ne semble pas que le cours du cruzeiro doive se stabiliser pour l'instant, mais les effets de sa dévaluation devraient être compensés par l'accroissement de la consommation d'énergie électrique.

LE FONDS FÉDÉRAL POUR L'ÉLECTRIFICATION

La même loi nº 2308 qui a créé la taxe sur l'électricité a institué le fonds fédéral pour l'électrification, qui sera constitué comme suit : *a*) la part (40 pour cent) du produit de la taxe sur l'électricité qui revient au Gouvernement fédéral; *b*) la part (20 pour cent) du produit de la taxe frappant les transferts de fonds du Brésil dans d'autres pays ***; *c*) des crédits inscrits au budget fédéral, qui ne seront pas inférieurs à 4 pour cent du produit des impôts indirects perçus l'année précédente ****; *d*) les intérêts produits par les dépôts des capitaux du Fonds lui-même et par le placement de ces capitaux.

Les recettes annuelles de la taxe sur l'électricité peuvent être évaluées à deux milliards de cruzeiros, comme on l'a vu plus haut; 40 pour cent de ce montant, soit 800 millions de cruzeiros, seront attribués au fonds fédéral d'électrification.

D'après le budget fédéral pour 1955, le produit de la taxe sur les transferts de fonds s'élèvera à 2,1 milliards de cruzeiros, dont 20 pour cent (420 millions de cruzeiros) seront attribués au fonds d'électrification.

D'après le budget fédéral pour 1955, le produit des impôts indirects s'élèvera à 15 886 900 000 cruzeiros. Compte tenu des indications précédentes, on peut donc prévoir que 640 millions de cruzeiros seront attribués au fonds sur ce montant.

On peut donc évaluer à 1 860 millions de cruzeiros, non compris les intérêts, le revenu annuel destiné au fonds d'électrification :

	Cruzeiros
Poste *a*	800 000 000
Poste *b*	420 000 000
Poste *c*	640 000 000
	1 860 000 000

LE PLAN NATIONAL D'ÉLECTRIFICATION

En avril 1954, le Congrès a été invité à donner sa sanction à la création du plan national d'électrification *****. La question est toujours en cours d'examen.

---

* « A industria de Energia Eletrico no Brasil », nº 19 de la revue *Aguas e Energia Elétrica*, publiée par le Conselho Nacional de Aguas e Energia Elétrica, Rio de Janeiro, p. 65.

** Dans le budget fédéral du Brésil pour 1955, il est prévu que le revenu de la taxe s'élèvera à 1 milliard de cruzeiros (Orçamento Geral da Uniao para o Exercicio de 1955, loi nº 2368, 9 décembre 1954, Imprensa Nacional, Rio de Janeiro).

*** Le transfert de fonds exportés du Brésil fait l'objet d'une taxe de 5 pour cent (loi nº 156 du 27 novembre 1947).

**** C'est le décret nº 26149, du 5 janvier 1949, qui réglemente la perception des impôts indirects (taxe à la consommation).

***** Circulaire nº 134-1954 du 10 avril 1954, dans « Plano Nacional de Eletrificaçao e Centrais Elétricas Brasileiras SA », Imprensa Nacional, Rio de Janeiro.

Le projet de plan était accompagné d'une étude très fouillée des problèmes de l'énergie électrique au Brésil *.

Les auteurs de cette étude ont examiné les difficultés auxquelles se heurte l'industrialisation du Brésil, pays immense où l'on n'a découvert jusqu'ici que des gisements de charbon de médiocre qualité et ne suffisant pas, de surcroît, aux besoins du pays. L'utilisation du bois comme combustible devient trop onéreuse, indépendamment du fait que le déboisement nuit à la conservation du sol. Par contre, le potentiel hydraulique est élevé, mais jusqu'à présent, seule une faible proportion en a été exploitée.

Il semble donc qu'il y ait avantage à s'adresser aux ressources hydrauliques comme principale source d'énergie; d'autres sources d'énergie sont déjà utilisées et continueront de l'être, mais ne devraient être considérées que comme un pis-aller pour les régions dépourvues de ressources hydrauliques. Mais la situation pourrait se modifier, si l'on découvrait dans le pays des gisements de charbon plus importants et de meilleure qualité, des réserves de pétrole plus abondantes, ou s'il était possible de produire dans des conditions économiquement acceptables de l'énergie nucléaire utilisable par l'industrie **.

A longue échéance, l'énergie hydroélectrique est la source d'énergie la moins onéreuse, car les frais d'exploitation en sont très faible, le vieillissement du matériel lent et les marges d'amortissement des installations peu importantes; mais les mises de fonds initiales sont généralement plus élevées que pour les centrales thermoélectriques, et ce point n'est pas sans importance pour un pays qui commence à se développer.

L'ampleur du problème a amené les pouvoirs publics à intervenir directement, et les autorités de certains états, ainsi que le Gouvernement fédéral, sont déjà passé aux actes; on peut espérer que les mesures soumises à l'approbation du Congrès stimuleront encore ces activités. Toutefois, pour ce qui est du plan d'électrification, ces mesures directes viseront uniquement les centrales et les lignes de transport, à l'exclusion de la distribution et de la fourniture d'énergie électrique aux consommateurs. L'initiative privée pourra également supporter, dans une certaine mesure, la charge du développement de l'industrie électrique, comme elle l'a fait jusqu'à présent.

Voici quelques-unes des mesures auxquelles a déjà donné lieu l'étude du problème de l'énergie électrique :

— Établissement d'une carte du Brésil montrant la concentration urbaine et donnant les chiffres de population des centres urbains;

— Calcul du nombre de kilowattheures consommés par habitant et par année, pour chaque centre;

— Ajustement des chiffres ainsi obtenus;

— Détermination du taux spécifique d'accroissement démographique;

— Calcul de la consommation d'énergie par habitant;

— Détermination de l'accroissement de la consommation d'énergie dans chaque région, en chiffres absolus;

— Examen des possibilités spéciales de développement;

— Évaluation des coefficients de charge actuels et futurs.

Compte tenu de cette analyse, le Brésil a été divisé en deux grandes régions : la région des grandes centrales, qui borde la côte atlantique de l'extrême sud au nord-est du pays, où la densité de la population est la plus forte; et la région des réseaux indépendants, à population clairsemée, où les centres urbains sont situés à de longues distances les uns des autres.

La région des grandes centrales couvre 12 pour cent de la superficie du Brésil, et comprend 60 pour cent de sa population; la région des réseaux indépendants couvre 88 pour cent de la superficie du territoire, mais n'abrite que 40 pour cent de la population.

La région des grandes centrales a été divisée en onze zones, et chacune de ces dernières a fait l'objet d'une étude détaillée. Le plan prévoit la répartition des réseaux électriques existants en trois groupes principaux : *a*) le Groupe ENE, avec la centrale de Paulo Afonso pour centre; *b*) le Groupe E, s'étendant de l'état d'Espirito Santo à l'état de Santa Catarina; *c*) le Groupe S, comprenant l'état de Rio Grande do Sul.

Ces trois groupes pourront être interconnectés ultérieurement, à mesure que l'électrification du pays se poursuivra. C'est le Gouvernement fédéral qui se chargera de l'exécution des travaux prévus pour cette région.

Dans la région des réseaux indépendants, les distances séparant les villes et les villages sont si grandes qu'il est impossible de préconiser l'interconnexion des réseaux électriques; les travaux seront entrepris conjointement par le Gouvernement fédéral et les autorités des états et des municipalités, ou par ces dernières seulement avec l'assistance technique et financière du Gouvernement fédéral. Dans cette région, la solution du problème doit être recherchée par la construction de centrales isolées; peut-être serait-il possible à la longue de les relier aux réseaux de distribution les plus proches.

---

* « Memoria Justificativa do Plano de Eletrificaçao », J. Soares Pereira, Fabio Valverde Rodrigues Bastos, Walter José von Krüger, Mario Pimentel Bittencour Leal, José Carlos do Couto Vianna, Ignacio de Mourao Rangel, dans « Plano Nacional de Eletrificaçao e Centrais Elétricas Brasileiras SA ».

** Voir dans le présent volume les séances 3, 4 et 5.

La région des grandes centrales sera équipée principalement de grosses génératrices hydrauliques, outre quelques centrales thermiques chauffées au charbon qui seront installées dans le sud, à proximité des bassins houillers. Pour les réseaux indépendants, il faudra construire des centrales thermo-électriques (équipées de moteurs diesel ou fonctionnant à la vapeur) dans les régions dépourvues d'énergie hydraulique; l'électrification des campagnes exigera des installations du même type, mais de capacité inférieure.

On envisage de faire face aux dépenses entraînées par l'électrification du Brésil par les moyens suivants :

a) Pour les réseaux groupés autour des grandes centrales, au moyen du fonds fédéral pour l'électrification et de la part du produit de la taxe sur l'électricité qui revient aux états et aux municipalités;

b) Pour les réseaux indépendants, au moyen de la part du produit de la taxe générale qui revient aux états et aux municipalités;

c) Pour l'électrification rurale, également au moyen de la part du produit de la taxe générale qui revient aux états et aux municipalités, et de la part du produit des contributions indirectes à laquelle les municipalités ont droit en vertu de la Constitution brésilienne *.

Les compagnies privées existantes ou futures auront toute latitude de procéder à de nouveaux investissements. En effet, l'idée qui sert de base à ce plan est que la libre entreprise doit être assistée dans l'électrification du pays, les pouvoirs publics assumant directement les travaux qui dépassent les moyens du secteur privé.

On pense que le développement des services de distribution d'électricité prévu par le plan favorisera la création de nouveaux établissements industriels, non seulement dans les centres urbains existants, mais encore sur une étendue beaucoup plus vaste. Une partie de ces établissements seront probablement installés loin de Sao Paulo et de Rio de Janeiro, les deux principaux centres industriels du pays. L'abaissement du coût de l'électricité pourrait amener l'industrie à se décentraliser au profit de régions moins développées.

Au Brésil, seules quelques centrales de peu d'importance produisent du courant continu; les grandes centrales produisent du courant électrique à 50 ou 60 périodes par seconde. Les auteurs du plan ont saisi l'occasion d'uniformiser les fréquences à 60 périodes, et cet objectif sera atteint par étapes. Les nouvelles centrales qui seront construites dans les régions consommant du courant à 50 périodes, devront pouvoir fonctionner tant à 50 qu'à 60 périodes.

On estime qu'il sera nécessaire d'importer des États-Unis d'Amérique pour plus de 500 millions de dollars de biens d'équipement, afin d'assurer l'exécution des travaux prévus par le plan. A cela viennent s'ajouter les travaux entrepris par l'industrie privée. Ces importations opéreront un important prélèvement sur les ressources brésiliennes en dollars (commerce extérieur); c'est pourquoi il est devenu non seulement opportun, mais encore extrêmement urgent, de produire les biens d'équipement nécessaires à l'industrie électrique au Brésil même. L'industrie privée produit déjà du matériel d'éclairage et de l'équipement moyen. Dans le cadre du plan, le Gouvernement fédéral se chargera de la production de l'équipement lourd.

Les auteurs du plan ont tenu compte de certains autres éléments; il s'agit notamment de la création de services statistiques permanents, de travaux d'étude et de recherche sur les sources d'énergie, de l'amélioration des organismes administratifs, de l'aménagement des dispositions législatives relatives à l'énergie électrique, de la liaison des réseaux électriques, de la gestion financière et économique du fonds fédéral pour l'électrification, de l'électrification des chemins de fer et de la formation de techniciens.

Le projet de loi soumis au Congrès en avril 1954 prévoit l'établissement d'un plan national pour l'électrification et l'adoption de mesures complémentaires. Le plan se divise en deux sections : la partie A (prioritaire) et la partie B.

On a estimé que les dépenses nécessaires à la réalisation de la partie A s'élevaient à 19 482 millions de cruzeiros, répartis comme suit :

	Millions de cruzeiros
1. Réseaux reliés aux grandes centrales . .	14 514
2. Réseaux indépendants et services locaux	2 268
3. Normalisation des fréquences	1 000
4. Industrie de l'équipement électrique lourd	1 500
5. Recherches, développements ultérieurs et administration	200
	19 482

Les 14 514 millions de cruzeiros prévus au poste 1 sont affectés à :

— La construction de 11 nouvelles centrales hydroélectriques, dont la puissance installée s'élèvera au total à 1 278 000 kW;

— L'agrandissement de 3 centrales hydroélectriques existantes, dont la capacité s'accroîtra de 440 000 kW;

— La construction d'une nouvelle centrale thermique au charbon, dont la puissance atteindra 200 000 kW;

— L'aménagement de 114 nouvelles lignes de transport, de 380 kV ou moins;

* Constitution de la République fédérale des États-Unis du Brésil, article 15, paragraphe 4.
« L'Union distribuera aux municipalités, à l'exception des capitales, dix pour cent des recettes totales des taxes perçues au titre des dispositions de l'article 4. La répartition sera faite de façon égale, la moitié de la somme au moins devant être affectée à l'aménagement des campagnes. »

— La construction de sous-stations.

La puissance supplémentaire qui, d'après ces prévisions, sera installée dans la région desservie par les réseaux reliés à la grande centrale, s'élèvera à 1 918 000 kW. Les lignes d'interconnexion permettront de tirer un meilleur parti des centrales existantes, de sorte que l'augmentation des fournitures effectives d'énergie représentera peut-être une puissance supérieure à la puissance installée.

Les travaux à exécuter au titre du poste 2 de la partie A ne sont pas décrits en détails dans le plan. L'amélioration des réseaux autonomes restera du ressort des états et des municipalités, qui utiliseront à cet effet le produit de la taxe générale. Ces travaux bénéficieront également de l'assistance financière que le Gouvernement fédéral accordera sur les 2 268 millions de cruzeiros prévus au poste 2. Ces crédits devraient permettre d'installer 400 000 kW, dont environ 300 000 kW seront produits dans des centrales thermiques, et 100 000 kW dans des centrales hydrauliques. Ainsi la puissance installée au titre de la partie A du plan s'élèverait à 2 318 000 kW.

Le poste 3 est destiné à couvrir les dépenses entraînées par la normalisation des fréquences à 60 périodes par seconde.

La somme de 1 500 millions de cruzeiros prévue au poste 4 doit servir à mettre sur pied la production massive d'équipement lourd pour l'industrie électrique. Cette production sera assurée soit pour l'industrie privée avec l'assistance des pouvoirs publics, soit par les pouvoirs publics seulement.

La partie B du plan, qui prévoit un investissement de 12 915 600 000 cruzeiros, projette notamment :

— La construction de 7 nouvelles centrales hydrauliques, d'une puissance de 765 000 kW;

— L'agrandissement de 3 centrales hydrauliques, dont la puissance s'accroîtra de 390 000 kW;

— L'agrandissement d'une centrale thermique au charbon, dont la capacité s'accroîtra de 30 000 kW;

— L'installation de 45 nouvelles lignes de transport sous tension de 220 kV ou moins;

— La construction de sous-stations.

Tous ces travaux seront entrepris dans la région desservie par les réseaux des grandes centrales. La puissance qui sera installée au titre de la partie B s'élèvera à 1 185 000 kW; l'exécution des parties A et B du plan fournira au total une puissance installée de 3 503 000 kW.

Les travaux s'échelonneront sur 10 ans, et le Gouvernement fédéral estime devoir consacrer à la réalisation du programme 32 397 600 000 cruzeiros, qui seront en partie réinvestis *.

Le projet de loi prévoit que, pendant les dix premières années de la réalisation du plan, le pouvoir exécutif sera habilité à lancer des emprunts à l'étranger jusqu'à concurrence de 250 millions de dollars des États-Unis d'Amérique.

L'exécution du plan sera dirigée par une commission spéciale placée directement sous l'autorité du Président du Brésil; les travaux seront effectués par une compagnie créée spécialement à cet effet (l'Eletrobrás).

L'organisation de cette nouvelle compagnie est analogue à celle de la « Petróleo Brasileiro SA » (Petrobrás) qui est chargée de la mise en valeur des ressources du Brésil en pétrole. La nouvelle compagnie « Centrais Elétricas Brasileiras SA » (Eletrobrás) sera elle aussi un organisme mixte dont la majorité des actions appartiendra au Gouvernement fédéral; elle exercera son activité soit directement, soit sous la forme d'une société de holding, exerçant un contrôle pour le compte d'autres compagnies auxiliaires créées par l'Eletrobrás, qui fondera ces compagnies seule ou avec la collaboration des états et des municipalités.

L'Eletrobrás disposera au départ d'un capital de 3 milliards de cruzeiros, qui sera constitué par les avoirs et les droits actuels du Gouvernement fédéral, auxquels viendront s'ajouter, si besoin est, les capitaux du fonds fédéral pour l'électrification. Ultérieurement, le capital de l'Eletrobrás sera porté à 15 milliards de cruzeiros en 1965 **.

L'Eletrobrás aura pour tâche de préparer et d'établir les plans des centrales électriques, d'assurer leur construction et leur exploitation, d'organiser la transmission et la distribution de l'électricité et la fabrication de l'équipement électrique lourd, en se conformant aux stipulations du plan national d'électrification. Elle se chargera également de la fabrication des biens d'équipement lourd si la production du secteur privé ne répond pas aux besoins.

NOUVEAUX ÉLÉMENTS DU PROBLÈME DE L'ÉNERGIE AU BRÉSIL

Les autorités chargées de définir le programme d'électrification exposé aux pages précédentes ont examiné attentivement tous les facteurs qui jouent un rôle important dans ce domaine. Ce sont : *a*) l'insuffisance réelle des approvisionnements en électricité; *b*) l'accroissement continu de la demande qui résulte de l'accroissement démographique, de l'augmentation de la consommation par habitant et de l'industrialisation du pays; *c*) les difficultés soulevées par l'utilisation courante du bois comme combustible, le bois ne convenant pas à la production massive d'énergie électrique; *d*) la qualité médiocre du charbon et la pauvreté des gisements brésiliens; *e*) la production limitée des réserves de pétrole

* Voir plus haut l'évaluation des dépenses pour les premières années d'exécution du plan.

** C'est l'Union fédérale qui souscrira entièrement l'emprunt initial de 3 milliards de cruzeiros; elle souscrira aux émissions suivantes dans la mesure nécessaire pour s'assurer une participation majoritaire représentée par 51 pour cent des actions au moins.

connues; *f*) l'existence de ressources hydrauliques importantes et abondantes.

Tous ces facteurs nous ont amené à conclure que la solution du problème que pose l'approvisionnement du Brésil en électricité doit être recherchée dans la construction de centrales hydrauliques, les centrales thermiques servant seulement d'appoint. L'ampleur des investissements nécessaires pour faire face aux besoins actuels et futurs nous a amené à établir un budget qui a déjà été adopté par le pouvoir législatif.

Cependant, depuis l'adoption de ce budget, deux nouveaux facteurs sont entrés en jeu : la découverte de nouveaux gisements de pétrole très prometteurs et la possibilité d'utiliser l'énergie nucléaire pour produire de l'électricité.

En février 1955, le pétrole a jailli d'un puits de 2 700 mètres de profondeur à Nova Olinda, sur les rives de la Madeira, au cœur du bassin de l'Amazone, à plus de 2 000 km de la côte Atlantique. Les premières analyses ont montré que le pétrole était de bonne qualité, et on espère vivement que ce puits sera le premier d'une région très étendue, dont la structure géologique est relativement homogène. On soumet actuellement les échantillons de pétrole de Nova Olinda à des analyses dont les résultats seront plus significatifs, et on fore d'autres puits dans la région. Les résultats de ces travaux sont d'une importance capitale.

Les importations de pétrole représentent la charge la plus lourde pour l'équilibre économique du Brésil, dont la production nationale n'atteint que 5 000 barrels (795 000 l) par jour, soit moins de 3 pour cent de la consommation. Par conséquent, si la production brésilienne de pétrole augmente sensiblement, l'ensemble de la situation économique du pays s'améliorera. De ce fait, le programme d'électrification pourra progresser à un rythme plus rapide. L'augmentation de la production de pétrole permettra également de construire davantage de centrales thermiques de faible et moyenne importance fonctionnant à la vapeur ou équipées de moteurs diesel. Toutefois, la grande centrale hydraulique restera toujours le meilleur moyen de pourvoir à la plus grande partie de la demande, malgré l'amélioration du rendement obtenue en utilisant la vapeur à très haute pression.

ÉNERGIE ÉLECTRONUCLÉAIRE

Une nouvelle méthode de production de l'énergie électrique est venue s'ajouter aux procédés classiques de conversion de l'énergie hydraulique et de l'énergie thermique : c'est la conversion de l'énergie nucléaire. Étant donné qu'il existe des minerais d'uranium et de thorium au Brésil, il semblerait, au premier abord, que cette nouvelle méthode doive permettre au pays de faire face à la nécessité urgente où il se trouve d'augmenter sa production d'énergie électrique sur l'ensemble de son immense territoire où les combustibles minéraux sont insuffisants et où l'organisation des transports pose, en conséquence, un grave problème.

Dans les conditions actuelles de la technique, la « centrale électronucléaire » est très semblable à la centrale à vapeur de type classique; la différence essentielle réside dans le générateur de vapeur; la vapeur est produite non par la combustion de charbon ou d'huile minérale, mais par la chaleur dégagée dans une pile atomique, qui peut être éventuellement munie d'un échangeur de chaleur. Certaines différences sont également dues aux méthodes de traitement des matières radioactives.

Dans une centrale électronucléaire, il faudra renouveler périodiquement le combustible; toutefois, 1 kg de « combustible nucléaire » équivaudra à des milliers de tonnes de charbon ou de mazout.

A les comparer aux centrales hydrauliques, il ne semble pas y avoir de raison de préférer les centrales électronucléaires. Le coût initial de ces centrales d'un nouveau type ne sera pas inférieur à celui de la centrale thermique de type classique; il sera même probablement plus élevé. L'exploitation de centrales hydrauliques sera sans conteste plus économique. Par conséquent, aussi longtemps qu'une installation hydraulique sera plus avantageuse qu'une installation thermique, l'installation hydraulique sera à plus forte raison préférable à l'installation nucléaire. Il convient donc d'opposer les chances de succès des centrales électronucléaires à celles des centrales thermiques de type classique, et non pas à celles des centrales hydrauliques.

Deux types de centrales thermiques sont en usage dans le monde entier : les centrales à groupe diesel et les centrales à vapeur.

De ces deux types, la centrale à groupe diesel est d'une exploitation plus onéreuse, car elle consomme des combustibles plus coûteux et sa vie est plus brève. En règle générale, les génératrices diesel ne sont installés que dans des centrales de petite ou de moyenne importance dont la puissance ne dépasse guère quelques milliers de kilowatts. Elles sont avantageuses en ceci qu'elles peuvent être construites rapidement et à moindres frais et peuvent être mises rapidement en service.

Cependant, les centrales à vapeur produisent de l'énergie électrique au prix d'une dépense de combustible moins élevée, leurs installations ont une plus longue durée de vie et le choix de leurs dimensions est illimité. Les génératrices électriques les plus puissantes sont entraînées par des turbines à vapeur; leur capacité peut atteindre des centaines de milliers de kilowatts.

Il convient de peser deux éléments essentiels en comparant la centrale thermonucléaire à la centrale à vapeur de type classique : le coût initial et les dépenses en combustibles. En outre, il faut tenir compte d'autres facteurs : d'une part, les moyens qui permettent de transporter le combustible nucléaire, la présence de minerais d'uranium et de thorium, la production de sous-produits ayant une

valeur commerciale élevée, les possibilités de progrès technique et scientifique offertes par l'industrie atomique; d'autre part, l'ignorance où l'on est encore du comportement d'une centrale électronucléaire dans les conditions normales de fonctionnement, les frais d'entretien et les problèmes que pose le personnel chargé de l'exploitation.

Si le coût initial et les dépenses en combustibles se révèlent moins élevés pour la centrale électronucléaire que pour la centrale à vapeur de type classique, il faudrait donner la préférence à la première; à tout le moins, il faudrait étudier attentivement l'aménagement de ce nouveau type de centrale partout où l'on envisagerait de construire de nouvelles installations. Certes, on ne peut guère espérer que tel soit le cas, du moins en ce qui concerne les premières centrales électronucléaires; mais il vaut néanmoins la peine d'étudier la possibilité d'utiliser des centrales électronucléaires, même si les frais d'installation, d'exploitation et d'entretien sont plus élevés que pour les centrales à vapeur de type classique.

Dans l'établissement du prix de revient initial, la différence essentielle découle du coût du générateur de vapeur. Dans une centrale thermique chauffée au charbon ou aux produits pétroliers, le générateur de vapeur absorbe environ 30 pour cent des investissements totaux (construction, aménagement, pose).

Les dépenses en capital représentent elles-mêmes près de 30 pour cent du coût de la production d'énergie, calculé aux bornes de la station; le générateur de vapeur compte donc pour environ 9 pour cent dans le prix de revient des kilowattheures produits.

Le prix de vente du kilowattheure au consommateur atteint plusieurs fois le prix de revient à la centrale, en raison des frais de transport, de distribution et de transformation, ainsi que du coût d'entretien et d'exploitation du réseau. Le coût du générateur de vapeur ne représente par conséquent qu'une faible fraction du prix de vente du kilowattheure, peut-être 2 à 5 pour cent de ce prix.

La pile atomique peut donc coûter beaucoup plus cher que le générateur de vapeur de type classique dont elle devrait prendre la place, sans qu'il en résulte une hausse sensible du prix de vente du kilowattheure. L'utilisation d'une pile atomique qui coûterait le double d'un générateur de vapeur, par exemple, entraînerait une majoration du prix du kilowattheure de l'ordre de 2 à 5 pour cent.

Il convient maintenant de préciser ce que l'on entend par « coût d'une pile ». Le coût d'un générateur de vapeur de type classique ne comprend pas le prix du combustible (charbon ou pétrole); en comparant les coûts initiaux, il s'agit donc de savoir si l'on tiendra compte du coût du « combustible nucléaire » dans le calcul du coût de la pile. Si le coût de la pile ne comprend pas celui du combustible nucléaire, elle peut éventuellement paraître plus avantageuse que le générateur à vapeur.

Mais précisément, le problème de l'approvisionnement en combustible se pose différemment pour la centrale à vapeur de type classique et pour la centrale électronucléaire; dans le premier cas, l'achat et le stockage des combustibles ne porte que sur de brèves périodes (de quelques mois à moins d'un mois); la pile, au contraire, au moment où elle entre en fonctionnement, doit être alimentée en combustible nucléaire pour de nombreux mois. Les disponibilités devront donc nécessairement être plus élevées pour l'approvisionnement de la pile en combustible. Cette remarque nous amène au second point de notre étude : le coût du combustible.

Le charbon ou le pétrole représentent de 15 à 40 pour cent du coût du kilowattheure calculé aux bornes de la station; cette proportion varie selon le rendement de l'installation et les coefficients de charge. L'influence du coût du combustible sur le prix de l'énergie électrique est donc beaucoup plus importante que celle du coût initial de la centrale. Si le coût du combustible double, le prix de revient du kilowattheure aux bornes de la centrale peut augmenter de 15 à 20 pour cent. En conséquence, la question du coût du combustible nucléaire qui doit être utilisé dans la pile exige une étude plus attentive que les frais d'installation de la pile elle-même. Admettons cependant que si l'on installe une centrale électronucléaire dans un réseau mixte, où fonctionnent également des centrales à vapeur ou des centrales hydrauliques, l'augmentation des prix de revient du kilowattheure produit par la centrale électronucléaire peut se révéler négligeable dans le prix moyen final de l'énergie produite par l'ensemble du réseau.

Du point de vue du transport, le combustible nucléaire devrait être nettement plus avantageux que les combustibles minéraux; même si l'on tient compte des matériaux pondéreux nécessaires à la construction des dispositifs de sécurité et de protection contre les rayonnements, le poids du combustible nucléaire sera de beaucoup inférieur à celui de son équivalent en combustibles minéraux. De ce fait, la diminution des frais de transport revêt une importance très grande dans des régions où les moyens de transport sont médiocres, comme c'est le cas dans les pays insuffisamment développés.

Il convient également d'inscrire à l'actif de la centrale électronucléaire les sous-produits obtenus à l'aide de piles de certains types et ayant une valeur commerciale élevée. Les possibilités de recherche qu'offrent l'installation et l'exploitation d'une centrale électronucléaire ont également leur importance.

En l'état actuel des recherches, on sait que l'on peut fabriquer des piles plus rentables que celles qui ont été expérimentées jusqu'à présent. La pile autorégénératrice peut fonctionner en consommant beaucoup moins de combustible coûteux (uranium-235), et il faut se rappeler que les piles viennent d'arriver au stade de l'exploitation industrielle; on doit

s'attendre à des améliorations, comme ce fut le cas pour les centrales à vapeur de type classique; les premières centrales de ce type qui furent mises en service il y a 75 ans consommaient plus de 10 kg de charbon par kilowattheure, alors que les centrales modernes en consomment moins de 0,5 kg par kilowattheure.

En bref, la centrale électronucléaire soutient d'ores et déjà la comparaison avec les centrales thermiques de type classique; même si les centrales électronucléaires produisent de l'électricité à des coûts plus élevés que les centrales ordinaires, elles offrent de bonnes possibilités; il y a lieu d'espérer que le coût de l'énergie de source atomique diminuera lorsque son utilisation se généralisera; enfin, ce nouveau mode de production d'énergie électrique offre des perspectives très favorables aux régions où les moyens de transport sont insuffisants.

L'exploitation de centrales thermiques est indiquée :

a) Lorsqu'on a besoin de faibles quantités d'énergie et que l'on n'a pas avantage, du point de vue économique, à investir les sommes importantes qu'exige la construction de centrales hydrauliques, même s'il existe des sources d'énergie hydraulique;

b) Comme centrales de réserve pour les réseaux de distribution d'électricité, et pour les divers endroits où il faut assurer la continuité des fournitures (par exemple les hôpitaux, les théâtres, etc.);

c) Comme centrales d'appoint dans les réseaux alimentés par des centrales hydrauliques, car elles en permettent une exploitation plus judicieuse;

d) Lorsque l'énergie hydraulique fait complètement défaut.

Dans le premier cas, on a besoin de petites génératrices et l'on préférera en règle générale le type diesel; dans le deuxième cas, les génératrices de faible et de moyenne importance seront également équipées de groupes diesel, et l'on pourra faire appel à la vapeur pour les génératrices plus puissantes. Dans les troisième et quatrième cas, il faut préférer la génératrice à vapeur dès que l'on a besoin d'une quantité moyenne ou élevée d'énergie.

Le remplacement éventuel des centrales thermiques à vapeur par des centrales électronucléaires s'effectuera en fonction des modèles proposés et de leurs dimensions, ainsi que des caractéristiques du lieu où la centrale devra être construite. Ainsi, dans le deuxième cas (centrales de réserve), il ne semble pas nécessaire d'installer des centrales électronucléaires. On ne dispose actuellement d'aucun renseignement précis sur les dimensions éventuelles des centrales électronucléaires; la dimension des centrales qu'il pourrait y avoir lieu de construire au Brésil sera donc étudiée, qu'il soit ou non possible, dans les conditions actuelles, de construire des centrales électronucléaires de dimension appropriée.

LE BRÉSIL ET L'ÉNERGIE ÉLECTRONUCLÉAIRE

Comme nous l'avons démontré plus haut, les piles atomiques peuvent être d'un coût plus élevé que les génératrices à vapeur de type classique qu'elles doivent remplacer, sans qu'il en résulte une augmentation marquée du coût de l'électricité. On peut faire observer, également, que la situation actuelle du Brésil est caractérisée par une forte hausse des prix des biens et des services de presque toutes les catégories, et que le prix de l'électricité n'a guère augmenté en comparaison de celui d'autres biens.

Il sera donc possible d'augmenter, dans une certaine mesure, les prix de l'énergie électrique si cette augmentation est contrebalancée par certains avantages, tels que la diminution des importations de combustibles minéraux et des frais de transport.

Il vaut certainement mieux exploiter des centrales électronucléaires consommant le combustible extrait des minerais d'uranium et de thorium brésiliens que d'employer des combustibles minéraux importés, comme le pétrole et le charbon. Même s'il faut majorer le prix de vente du kilowattheure, cette solution est avantageuse, car les matières fissiles pourront être payées en cruzeiros tandis que les importations de combustibles minéraux grèvent lourdement les ressources du pays en devises étrangères. En revanche, si l'utilisation d'une pile atomique doit être subordonnée à l'importation de matières fissiles, cette solution perd beaucoup de son intérêt, car les inconvénients seront les mêmes que pour les combustibles minéraux importés.

En ce qui concerne le transport, la balance semble pencher nettement du côté de la centrale électronucléaire, car les quantités de combustibles à transporter seront beaucoup moins élevées, et les moyens de transport sont insuffisants dans de très vastes régions du Brésil.

Voici le nombre de centrales qui étaient en service au Brésil en 1950, année choisie comme période de référence pour la préparation du plan national d'électrification :

988 centrales thermiques, produisant 346 830 kW (18,3 pour cent);

1 089 centrales hydrauliques, produisant 1 536 177 kW (81,7 pour cent),

soit au total : 2 077 centrales produisant 1 883 007 kW (100 pour cent).

Bien que le nombre des centrales thermiques fut sensiblement le même que celui des centrales hydrauliques, la puissance moyenne des premières était inférieure :

Puissance moyenne d'une centrale thermique : 351 kW;

Puissance moyenne d'une centrale hydraulique : 906 kW.

Tableau 1

Capacité installée

(Sans les prévisions du plan national d'électrification)

	1950	1952	1953	1954	1955	1956	1957	Total
Augmentation (en kW) :								
Centrales hydrauliques	—	—	86 300	518 650	224 000	424 825	428 550	1 682 325
Centrales thermiques	—	—	18 995	216 000	40 000	20 000	45 000	339 995
Total	—	—	105 295	734 650	264 000	444 825	473 550	2 022 320
Capacité (en kW) :								
Centrales hydrauliques	1 536 177	1 602 627	1 688 927	2 207 577	2 431 577	2 856 402	3 284 952	—
Centrales thermiques	346 830	372 388	391 383	607 383	647 383	667 383	712 383	—
Total	1 883 007	1 975 015	2 080 310	2 814 960	3 078 960	3 523 785	3 997 335	—

Le pourcentage de la puissance produite dans les centrales thermiques par rapport au total de la puissance installée (18,3 pour cent) est resté à peu près le même au cours de l'année suivante, et, selon toute probabilité, il ne se modifiera pas au cours des prochaines années, ainsi qu'il ressort du tableau 1*.

Au cours des cinq années 1953-1957, la puissance installée devrait doubler : 83 pour cent de la puissance installée sera produite dans des centrales hydrauliques et 17 pour cent dans des centrales thermiques. Ces pourcentages sont à peu près les mêmes qu'en 1950 (centrales hydrauliques : 82 pour cent; centrales thermiques : 18 pour cent).

Les travaux mentionnés ci-dessus sont en cours et seront complétés par les travaux prévus par le plan national d'électrification. La réalisation de ce plan permettra de produire environ 2 973 000 kW supplémentaires dans des centrales hydrauliques et 530 000 kW dans des centrales thermiques, de sorte que la puissance installée atteindra 7 500 000 kW au total en 1965.

Ainsi, bien que la majeure partie de la puissance soit d'origine hydraulique et doive continuer de l'être, il est et il sera toujours possible d'installer des centrales thermiques. C'est donc pour concurrencer ces dernières qu'on fera, le cas échéant, appel aux centrales électronucléaires. Pour évaluer la puissance totale des centrales thermiques, il convient d'ajouter la puissance qui sera installée par des entreprises privées aux 530 000 kW produits par les centrales thermiques qui seront éventuellement construites dans le cadre du plan national d'électrification. La puissance des nouvelles centrales thermiques qui seront installées jusqu'en 1965 peut donc être évaluée à 830 000 kW. Il ressort du tableau précédent que ces centrales supplémentaires produiront environ 30 000 kW par an, soit 300 000 kW en dix ans.

Or, on ne peut espérer que ces 830 000 kW puissent être produits en totalité dans des centrales électronucléaires. D'autre part, il existe dans le sud du pays (Rio Grande do Sul et Santa Catarina) des gisements de charbon que les centrales de grande ou de moyenne importance pourront consommer; on admet même que les centrales à vapeur qui, selon le plan, doivent produire 230 000 kW dans la région des grandes centrales pourront fonctionner en utilisant des charbons de qualité inférieure. Aussi a-t-on décidé de faire appel au charbon pour produire environ 300 000 kW dans des centrales thermiques, ce qui laissera le choix d'autres procédés pour la production des 530 000 kW supplémentaires.

Étant donné que la production brésilienne de pétrole est faible pour l'instant, elle ne jouera pas un grand rôle dans la production de ces 530 000 kW; mais si les nouveaux champs pétrolifères ouvrent des perspectives intéressantes, une partie de leur production viendra certainement alimenter les centrales thermiques fonctionnant soit avec un diesel, soit à la vapeur. Mais il faut plusieurs années pour mettre sur pied une grande industrie du pétrole, de sorte qu'il n'est pas nécessaire de tenir compte de la production des nouveaux champs pétrolifères lorsqu'on évalue la situation des prochaines années.

En résumé, au cours des dix prochaines années, les centrales électronucléaires pourront affronter la concurrence des centrales à groupes diesel ou des centrales à vapeur de type classique pour la production d'environ 500 000 kW.

* Carlos Berenhauser Jr. et Natercio Pereira : « Balanço dos Servicios de Eletricidade no Brasil », 1954.

La majeure partie de cette puissance sera engendrée par de petites centrales (8 000 kW ou moins) et par quelques centrales d'importance moyenne (jusqu'à 20 000 kW). Les possibilités d'aménager de grandes centrales thermiques sont lointaines, car elles ne correspondraient qu'à de grands centres urbains; or, ceux-ci peuvent être alimentés au moyen des ressources hydrauliques restant à exploiter.

Il semble indispensable à l'implantation de centrales électronucléaires au Brésil que les combustibles nucléaires puissent être extraits de minerais brésiliens traités dans le pays; sinon, leur utilisation se heurtera à des difficultés analogues à celles que doit surmonter actuellement l'exploitation des centrales à vapeur consommant du combustible importé, qui découlent de la pénurie de devises étrangères nécessaires pour couvrir les frais d'importation. Il faudrait donc mettre sur pied et développer au Brésil même une industrie atomique, comprenant la prospection d'uranium et de thorium, l'exploitation des gisements reconnus et le traitement des minerais, avec comme objectif bien défini la production des substances pures destinées aux piles atomiques.

On peut faire observer que l'industrie atomique elle-même consommera de l'énergie électrique, en quantités très importantes* peut-être. Ainsi, ceux qui établissent les plans de développement de cette industrie au Brésil, où la distribution d'électricité n'est pas toujours facile à assurer, ont des raisons supplémentaires de prévoir la construction de centrales nucléaires produisant de l'électricité.

La possibilité de produire de l'énergie électrique grâce aux réactions nucléaires ouvre de nouvelles perspectives à l'investissement de fonds publics et privés dans l'énergie atomique. Au Brésil, le fonds fédéral pour l'électrification doit permettre de contribuer financièrement au développement de l'industrie atomique, dans la mesure où cette industrie vise à produire de l'énergie électrique.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

1) Après la seconde guerre mondiale, le Brésil a souffert d'une pénurie générale d'électricité. Depuis lors, il n'a cessé de prendre des mesures très importantes pour remédier à cette situation; ainsi, de 1953 à 1955, la puissance des réseaux existants s'accroîtra de 2 millions de kW environ. Ces travaux sont actuellement exécutés par des compagnies privées et par les pouvoirs publics (Gouvernement fédéral, gouvernement des états et municipalités).

2) Le Gouvernement fédéral a procédé à une étude approfondie de la question, car la réalisation du plan exigeait des investissements supérieurs aux disponibilités de l'entreprise privée. En conséquence, il a institué une taxe sur l'électricité et un fonds fédéral pour l'électrification. D'autre part, il a établi un plan national d'électrification qui fournira environ 4 millions de kW de capacité supplémentaire.

Les auteurs du plan ont tenu compte du fait que le combustible minéral est rare et l'énergie hydraulique abondante dans de nombreuses régions du Brésil; c'est pourquoi l'ossature des grands réseaux électriques sera constituée par les centrales hydrauliques, les centrales thermiques étant destinées aux régions à population clairsemée (qui couvrent 88 pour cent du territoire brésilien et comprennent 40 pour cent de la population).

Les travaux seront entrepris par le Gouvernement fédéral, les états et les municipalités. De son côté, l'entreprise privée pourra toujours procéder à de nouveaux investissements. Le plan prévoit la normalisation des fréquences à 60 périodes par seconde, et le développement de l'industrie de l'équipement électrique.

On estime que les investissements nécessaires à la réalisation du plan d'électrification dépasseront 32 milliards de cruzeiros (environ 1 milliard de dollars des États-Unis d'Amérique).

3) Deux nouveaux facteurs sont entrés en jeu après que le plan national d'électrification eut été établi : la découverte de nouveaux champs pétrolifères dont on peut attendre une production très importante et la possibilité de construire des génératrices nucléaires.

Si la production brésilienne de pétrole augmente sensiblement, la situation économique de l'ensemble du pays s'améliorera et l'électrification pourra se poursuivre à un rythme plus rapide. Néanmoins, le plan ne sera pas modifié dans ses grandes lignes, car les grandes centrales hydrauliques auront toujours la préférence.

On ne peut envisager que les centrales électronucléaires du type actuellement réalisable puissent réellement concurrencer les grandes centrales hydrauliques; mais, dans la production d'électricité, elles se posent en rivales des centrales thermiques classiques.

4) En comparant les centrales électronucléaires aux centrales thermiques de type classique, il convient de tenir compte de deux éléments : le coût d'installation initial et le coût du combustible. Dans les investissements initiaux, le coût de la pile doit être comparé à celui du générateur de vapeur classique; ces coûts peuvent être très différents l'un de l'autre, sans entraîner une variation nette du prix du kilowattheure fourni aux consommateurs.

Le coût du « combustible atomique » revêt une plus grande importance encore, mais, même s'il devait être supérieur à celui du combustible minéral, la centrale électronucléaire pourrait avoir de sérieuses possibilités d'avenir.

---

* *Cf.* Thaxton G. W., *Impact of the Atomic Energy Program on the electrical Industry*, Electrical engineering, p. 592-596. A Oak Ridge, la Commission de l'énergie atomique des États-Unis d'Amérique a eu besoin de 225 000 kW pendant la période de démarrage, et l'on estime qu'au cours des prochaines années la demande atteindra 6 500 000 kW.

Le « combustible nucléaire » l'emportera nettement sur le charbon ou les produits pétroliers pour ce qui est du transport, car les quantités nécessaires sont beaucoup moins importantes. Cet élément joue un grand rôle dans les régions où les moyens de transport terrestre sont insuffisants.

Il faut également inscrire à l'actif de la centrale électronucléaire la possibilité de fournir d'utiles sous-produits, et aussi l'importante contribution qu'elle apportera aux progrès scientifique et technique. Étant donné que les piles atomiques font maintenant leur apparition sur le marché, on peut s'attendre à des perfectionnements très nets qui entraîneront une diminution du coût initial et des frais d'exploitation.

5) Si au Brésil la puissance électrique est, à l'heure actuelle, essentiellement d'origine hydraulique, les centrales thermiques ont cependant conservé leur place, surtout lorsqu'il s'agit de petites installations.

Au cours des dix prochaines années, les génératrices nucléaires entreront probablement en concurrence avec les centrales classiques, consommant des produits pétroliers ou du charbon, pour la production d'environ 500 000 kW au total. Les centrales électronucléaires pourront utilement être envisagées lorsqu'il s'agira d'installations de faible puissance (5 000 kW ou moins) et peut-être de moyenne importance (jusqu'à 20 000 kW). Pour des puissances supérieures, les centrales hydrauliques auront la préférence.

6) Il se peut que l'on réussisse au Brésil à produire de l'électricité à partir de piles atomiques, si le combustible nucléaire est extrait de minerais brésiliens traités dans le pays. L'utilisation de piles atomiques est subordonnée à la création et au développement d'une industrie atomique brésilienne.

7) La possibilité de produire de l'énergie électrique à partir de piles atomiques ouvre de nouvelles perspectives à l'investissement de capitaux dans l'industrie atomique, et le fonds national pour l'électrification est en mesure de contribuer financièrement au développement de cette industrie.

Les besoins et les possibilités de production d'énergie en Yougoslavie

par A. Blažek, I. Krovačević, K. Mirkov et G. Preci

C'est seulement après la fin de la première guerre mondiale que l'économie yougoslave a commencé de se développer et, en particulier, que le pays s'est peu à peu industrialisé. Ces débuts furent modestes; en raison des conceptions économiques en vigueur et de la situation générale de l'économie, l'industrie ne pouvait produire qu'à un rythme extrêmement lent, et le niveau de la production demeurait peu élevé. Aussi la période de l'entre-deux guerres, au cours de laquelle la Yougoslavie était considérée comme un pays sous-développé, ne constitue-t-elle pas une base de pronostics suffisante pour évaluer le développement économique probable du pays au cours d'une période plus longue.

Les dix années qui ont suivi la deuxième guerre mondiale, années au cours desquelles le développement économique a pris un nouvel essor, ne nous renseignent pas davantage sur les tendances probables du développement économique jusqu'à la fin de ce siècle. En effet, au cours de cette période, l'expansion du pays a été anormalement freinée par l'effet de circonstances exceptionnelles, telles que les séquelles de la guerre, l'isolement économique, etc.

Dans ce rapport, on a donc prévu les besoins en énergie pour les dix premières années, en évaluant les besoins et les possibilités de la production yougoslave jusqu'en 1965; pour la période suivante, en revanche, les chiffres indiqués sont l'extrapolation de la tendance actuelle de la consommation d'énergie dans un pays moyennement développé, compte tenu de l'accroissement de la population et des possibilités offertes par les ressources de la Yougoslavie en matières premières productrices d'énergie.

ÉVALUATION DES BESOINS EN ÉNERGIE

Les besoins totaux de la Yougoslavie en énergie ont été déterminés, puis ventilés selon les diverses utilisations, en tenant compte de toutes les formes d'énergie; ils sont exprimés en 10^{12} kilocalories.

Dans le cadre de la consommation générale, nous avons estimé que les besoins pourraient être ceux qu'indique le tableau 1.

Tableau 1

Année	Industrie, y compris les industries extractives	Transports	Consommation générale	Divers	Total en 10^{12} kcal
1952 .	29	14	40	5	88
1955 .	42	16	40	5	103
1960 .	62	21	42	6	131
1965 .	78	24	47	9	158
1975 .	105	31	55	16	207
2000 .	226	87	128	29	510

Les besoins totaux d'énergie par habitant augmenteraient au rythme indiqué par le tableau 2.

Tableau 2

Année	Total des besoins en 10^{12} kcal	Population, en milliers d'habitants	Nombre de 10^{12} kcal par habitant et par an
1940 . .	72	15 811	4,5
1945 . .	68	15 412	4,4
1950 . .	93	16 245	5,7
1955 . .	103	17 560	5,9
1960 . .	131	19 120	6,9
1965 . .	158	20 600	7,7
1975 . .	207	23 000	9,0
2000 . .	510	32 000	16,0

De ce dernier tableau se dégage un fait caractéristique : à savoir que, même si l'on évalue le total des besoins en énergie de l'an 2000 à cinq fois l'équivalent des besoins de 1955, la quantité d'énergie consommée par habitant reste encore inférieure à la norme; en effet, l'augmentation moyenne des besoins n'est en moyenne que de 3,6 pour cent par an. Notons cependant que les besoins modifieront sans doute très sensiblement la répartition des diverses sources d'énergie et, de ce fait, il est fort possible que les besoins « nets » augmenteront, en définitive, davantage que les besoins « bruts ». En effet, si l'on parvenait à réaliser des progrès appréciables dans l'exploitation, l'évaluation ci-dessus serait trop modeste; un accroissement de consommation tel qu'il est indiqué plus haut relègue encore

Original : anglais.

la Yougoslavie au rang des pays insuffisamment développés. C'est pourquoi on peut espérer que les besoins seront probablement plus élevés que ceux qui ont été chiffrés dans les tableaux ci-dessus.

RESSOURCES EN ÉNERGIE

Jusqu'ici ce sont surtout le bois et la houille qui ont pourvu aux besoins en énergie de la Yougoslavie (voir fig. 1). Cependant, les ressources existantes offrent la possibilité d'utiliser également d'autres formes d'énergie d'un rendement favorable (énergie hydraulique, pétrole brut, gaz naturel et énergie nucléaire).

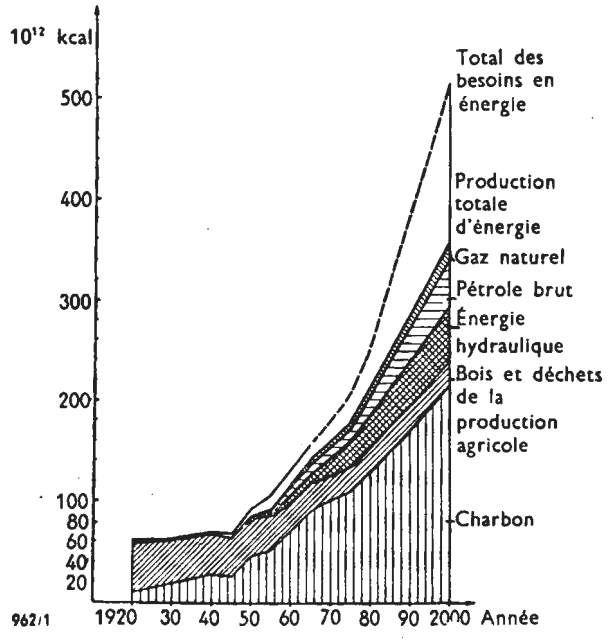


Figure 1. — Besoins futurs et décomposition par sources de la production d'énergie (en 10^{12} kcal).

ÉNERGIE HYDRAULIQUE

Le potentiel économique et technique d'énergie hydraulique en Yougoslavie est évalué à 66,5 milliards de kilowattheures au total. Dans ce potentiel économique et technique sont comprises toutes les possibilités effectives de construction de centrales hydrauliques, sur tous les cours d'eau, en prenant pour base les niveaux d'eau des années à précipitations moyennes. Les bassins des rivières yougoslaves ont deux régimes hydrauliques nettement différents. Dans la partie nord-ouest du pays, c'est le régime alpin qui domine, caractérisé par les hautes eaux d'été et les basses eaux d'hiver, alors que dans le reste du pays les cours d'eau ont un régime opposé. On peut établir une compensation entre ces deux régimes pendant les douze mois de l'année en employant un système qui tienne compte de ces caractéristiques opposées et en construisant des bassins d'accumulation qui permettent d'améliorer la situation.

En Yougoslavie, les lignes de partage des eaux sont la chaîne des Alpes, les Alpes Dinariques et d'autres massifs aux dénivellations abruptes d'où les eaux s'écoulent dans trois directions : vers la mer Noire, vers l'Adriatique et vers la mer Égée.

Le potentiel technique et économique de ces bassins peut s'exprimer par les chiffres suivants :

Nom du bassin	*Potentiel économique et technique*	
	10^9 kWh	MW
Bassin de la mer Noire . . .	43,2	10 390
Bassin de l'Adriatique . . .	19,2	4 910
Bassin de la mer Égée . . .	4,1	1 200
Total	66,5	16 500

Sur ce potentiel économique et technique total, on s'attend à ce que 61 milliards de kilowattheures soient exploités pendant la période considérée.

Charbon

Les explorations géologiques effectuées jusqu'ici permettent d'évaluer les réserves en charbon aux chiffres suivants :

Charbons gras	200
Charbons bruns	1 900
Lignite	19 200
Total.	21 300

Par réserves de charbon, nous entendons les gisements qui peuvent être exploités dans l'état actuel de la technique minière. Les chiffres ci-dessus ne comprennent ni les quantités de charbon situées sous les agglomérations, les cours d'eau, les lignes des chemins de fer, etc., ni celles que leur structure compliquée ou certaines conditions techniques ou géologiques rendent inexploitables.

La Yougoslavie dispose de quantités de charbon relativement importantes; cependant, la répartition des différentes espèces de charbons au sein de la quantité totale est défavorable, car, alors qu'on emploie un pour cent seulement de charbons gras et 8 pour cent de charbons bruns, on utilise 91 pour cent de lignite dont la qualité est généralement médiocre. De plus, le pays ne possède aucune réserve d'anthracite ni de charbon bitumineux de haute qualité cokéifiable.

Le pouvoir calorifique des réserves disponibles est le suivant (chiffres moyens) :

Charbons gras	environ 6 000 kcal
Charbons bruns	environ 4 000 kcal
Lignite	environ 2 400 kcal

En raison de la structure géologique des couches exploitables et de la faible valeur calorique du lignite, les possibilités d'exploitation des réserves de charbon sont donc limitées.

Pétrole brut

Les réserves de pétrole brut, évaluées d'après les résultats des explorations effectuées jusqu'ici, dépasseraient 60 millions de tonnes. Ce chiffre comprend les réserves dont l'importance a pu être calculée : 1) en tenant compte des couches de naphte dont des forages ont permis de constater l'existence dans des gisements en exploitation; 2) en tenant compte des couches de naphte dont l'exploration par forage a déjà commencé, mais n'est pas encore achevée; 3) enfin, en tenant compte des possibilités qu'offrent les régions où l'exploration géologique et géophysique est terminée et qui réunissent les conditions les plus favorables à la présence de pétrole brut, les possibilités de ces régions étant évaluées sur la base de celles des zones de production effective. Dans ces calculs, le coefficient moyen d'exploitation a été fixé à 28 pour cent, eu égard à la qualité du pétrole brut.

Les réserves de pétrole brut reconnues jusqu'ici sont situées en divers endroits de la partie septentrionale de la Yougoslavie; ces régions comportent des couches sédimentaires appartenant à la période géologique récente et s'étendent de la frontière nord-ouest à la frontière est du pays.

Les couches pétrolifères sont situées à des profondeurs de 1 000 à 2 500 mètres. La présence de nombreux gisements de faible importance rend assez difficile l'exploitation du pétrole brut.

Gaz naturel

Les réserves de gaz naturel s'élèvent à 18 milliards de mètres cubes, selon les explorations effectuées jusqu'ici.

Ce chiffre comprend : les réserves dont l'importance a pu être calculée en se basant sur les dépôts exploitables découverts jusqu'ici; le gaz qui se dégage des couches gazéifiées où des forages ont déjà été entrepris, mais dont l'exploration n'est pas achevée; enfin, les réserves supposées, contenues dans les terrains dont l'exploration géologique et géophysique est terminée et qui sont situées dans les régions où on a déterminé à l'heure qu'il est la présence de pétrole ou de gaz. On a ajouté, aux quantités de gaz contenues dans ces dépôts, les quantités que les réserves de pétrole brut et de gaz de pétrole de tête de sonde peuvent fournir en même temps que du pétrole brut. Le coefficient d'exploitation a été fixé à 80 pour cent pour le gaz naturel et à 150 pour cent pour le gaz de pétrole de tête de sonde.

Les dépôts de gaz sont pour la plupart situés à proximité des gisements de pétrole brut.

Bois

Les réserves totales de bois en Yougoslavie sont évaluées à 750 millions de mètres cubes. L'accroissement naturel est d'environ 20 millions de mètres cubes par an.

Schistes bitumineux

La Yougoslavie possède également des schistes bitumineux en quantités considérables. L'importance de ces réserves n'a cependant pas encore été déterminée avec exactitude. La possibilité d'exploiter ces schistes bitumineux reste à étudier, de même que les possibilités techniques et économiques de transformer l'huile qu'ils fourniraient en produits terminaux dérivés. C'est pourquoi nous n'avons pas considéré ici les schistes bitumineux comme une source d'énergie.

ÉVALUATION DE LA PRODUCTION D'ÉNERGIE

Selon le bilan présenté ci-dessus, l'exploitation des sources d'énergie connues pourrait donner les résultats exprimés au tableau 3.

Tableau 3

Année	Énergie hydraulique	Charbon	Pétrole brut	Gaz naturel	En 10^{12} kcal	
					Bois et déchets de la production agricole	Total
1940 .	0,5	27	0,01	—	41	68
1945 .	0,5	25	0,2	—	39	65
1950 .	1	47	1	0,1	39	88
1955 .	2	51	2,5	0,4	35	91
1960 .	5	72	7	2,6	29	116
1965 .	10	90	10	4	27	141
1975 .	27	108	17	7	24	183
2000 .	52	215	44	16	23	350

Dans la production future, la plus grande partie des besoins du pays seraient couverts par les charbons, comme c'est déjà le cas actuellement. Mais l'énergie hydraulique, le pétrole brut et le gaz naturel joueraient un rôle beaucoup plus important qu'ils ne l'ont fait jusqu'ici, alors que l'utilisation des bois diminuerait considérablement. Ces perspectives ressortent encore plus clairement du tableau 4, qui indique, en pourcentage, comment la consommation d'énergie se décomposerait par sources, étant entendu que le bois est surtout utilisé comme combustible de ménage.

Tableau 4

Année	Énergie hydraulique	Charbon	Pétrole brut	Gaz naturel	Bois et déchets de la production agricole	Total
1940 .	0,7	39	—	—	60,3	100
1945 .	0,7	38,8	0,1	—	60,4	100
1950 .	1,1	53,4	1,1	0,1	44,3	100
1955 .	2,2	56	2,8	0,5	38,5	100
1960 .	4,3	62,1	6,1	2,3	25,2	100
1965 .	7,1	64	7,1	2,6	19,2	100
1975 .	14,8	59	9,3	3,7	13,2	100
2000 .	14,8	61,4	12,6	4,6	6,6	100

Le mode d'utilisation de l'énergie demeure peu satisfaisant, en raison de la part importante qui revient au charbon dans la production totale d'énergie.

La figure 1 montre le rôle respectif des diverses sources d'énergie dans la production totale, et également le rapport entre la production totale et les besoins totaux.

Les évaluations de production sont fondées sur l'hypothèse selon laquelle l'énergie hydraulique serait pleinement utilisée, et sur l'exploitation des réserves de charbon, gisements de pétrole et dépôts de gaz dans les meilleures conditions. Étant donné le développement encore insuffisant du pays, une telle production ne pourrait toutefois être obtenue que s'il existait des conditions financières favorables aux investissements nécessaires.

L'accroissement annuel moyen de la production serait de 3,1 pour cent.

En rapprochant le chiffre probable de production de celui des besoins évalués précédemment, et bien que ceux-ci restent inférieurs à la consommation d'énergie dans les pays développés, on voit donc que les besoins de l'an 2000 ne pourraient être satisfaits par les ressources disponibles que dans la proportion de 70 pour cent. Il faudrait combler le déficit en énergie, qui serait alors de l'ordre de 160×10^{12} kcal, en exploitant de nouvelles sources d'énergie.

Il résulte de ce qui précède qu'il n'est pas trop tôt pour créer les conditions préliminaires qu'exige l'exploitation de l'énergie nucléaire à des fins industrielles.

L'énergie électrique en Australie de 1955 à 2004

par le Commonwealth Department of National Development d'Australie

Le présent mémoire, par le sujet qu'il traite, répond au point de l'ordre du jour de la Conférence internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques intitulé « Besoins du monde en énergie électrique et thermique ». Il nous a semblé que chaque pays devait répondre à cette question par une étude de ses besoins en énergie électrique au cours du demi-siècle à venir, une estimation des possibilités dont il disposait pour faire face à ces besoins et une évaluation des frais qu'entraînerait leur satisfaction. Nous avons calculé ces possibilités et ces frais sur la base de nos ressources en énergie de type classique, en tenant compte des autres exigences que ces ressources pourraient avoir à satisfaire.

Le chapitre I du présent mémoire sert d'introduction. Dans la partie A de ce chapitre, nous avons esquissé la situation actuelle de l'Australie en ce qui concerne l'utilisation de l'énergie électrique, les conditions auxquelles cette énergie est fournie et les sources dont elle est tirée. Dans la partie B, nous nous sommes efforcés de définir avec plus de précision la nature du problème que posait la situation et nous avons examiné brièvement la méthode suivant laquelle nous nous proposions de le traiter au chapitre suivant.

On trouvera au chapitre II les évaluations, les discussions et les conclusions que nous avons tirées en ce qui concerne l'avenir.

Original : anglais.

CHAPITRE I. — INTRODUCTION

Partie A. — La situation actuelle en Australie

a) L'utilisation de l'énergie électrique en Australie

Comme dans d'autres pays industrialisés, la consommation d'énergie en Australie s'est accrue très rapidement. Elle s'élevait approximativement à 4 091 millions de kilowattheures en 1938-1939, en 1953-1954, elle avait atteint le chiffre de 12 397 millions de kilowattheures.

Le tableau 1 montre la structure approximative de la consommation par catégorie d'usagers, de 1948-1949 à 1953-1954.

Les raisons principales qui expliquent l'augmentation de la demande en énergie électrique sont les suivantes : 1) l'accroissement de la population; 2) l'accroissement de la consommation pour usage domestique par habitant ; 3) le développement de la production industrialisée des transports et, d'une façon générale, de la mécanisation utilisant l'énergie électrique comme force motrice; 4) le remplacement d'autres formes de force motrice par l'électricité.

Nous avons retracé, dans le tableau 2, les étapes de l'accroissement de la population en Australie depuis le début du vingtième siècle.

L'accroissement de la consommation d'énergie par habitant provient de l'élévation du niveau de vie, de l'apparition de nouveaux accessoires ou éléments de confort entraînant une dépense d'élec-

Tableau 1

Consommation d'énergie électrique

(En millions de kWh)

Usagers	1948/49	1949/50	1950/51	1951/52	1952/53	1953/54
Industrie et commerce .	4 820	5 029	5 684	6 027	6 162	7 142
Utilisation domestique .	2 289	2 544	2 920	3 260	3 665	4 120
Traction	835	712	683	695	779	777
Éclairage des voies publiques et divers	297	284	229	293	343	358
TOTAL	8 241	8 569	9 516	10 275	10 949	12 397

Sources : Commonwealth Bureau of Census and Statistics : Manufacturing Industries; Electric Light and Power Works; *Electricity Supply Association of Australia :* Statistics of the Electricity Supply Industry in Australia.

Tableau 2

Accroissement de la population

Période	Nombre d'années de la période	Accroissement numérique annuel moyen (en milliers d'habitants)	Taux annuel moyen d'accroissement (pour cent)		
			Accroissement naturel	Migration nette	Total
1901 à 1913	13	87	1,59	0,53	2,04
1914 à 1923	10	86	1,50	0,15	1,64
1924 à 1929	6	113	1,28	0,64	1,88
1930 à 1939[a]. . . .	10	57	0,82	0,03	0,85
1940 à 1946[a]. . . .	7	73	0,98	0,03	1,01
1947 à 1954[a]. . . .	8	176	1,36	1,10	2,46

[a] Dans les chiffres de la population sont comprises les forces australiennes stationnées outre-mer entre septembre 1939 et juin 1947.

tricité, et des améliorations apportées à la distribution d'électricité dans les régions isolées. En outre, le prix moyen du courant a proportionnellement moins augmenté que les revenus ou les prix des denrées en général.

L'Australie est un producteur important de matières premières; celles-ci occupent une place prédominante dans ses exportations. Mais du point de vue de son économie interne, l'Australie est tout autant un pays industriel que producteur de matières premières. En 1954, la main-d'œuvre employée dans les industries de transformation représentait presque 30 pour cent de l'effectif total de la main-d'œuvre nationale, alors que les industries primaires, y compris les industries extractives, n'employaient qu'environ 15 pour cent de la main-d'œuvre nationale.

L'utilisation toujours croissante de l'énergie électrique dans la plupart des usines est indiquée par la puissance totale exprimée en chevaux-vapeur que développent l'ensemble des groupes électrogènes du pays. De 1938-1939 à 1950-1951, le nombre total de chevaux-vapeur développés par les moteurs des usines utilisant du courant fourni de l'extérieur a augmenté en moyenne de 8 pour cent par an. Pendant la même période, le nombre de chevaux-vapeur développés par les machines à vapeur ou les moteurs à combustion interne n'a augmenté que de 2,47 pour cent par an, l'effectif de la main-d'œuvre employée dans les usines de ce type augmentant de moins de 5 pour cent par an.

Il résulte de tout ceci que les besoins de l'Australie en énergie électrique ont augmenté beaucoup plus vite que sa population ne s'est accrue ou que l'ensemble de son économie ne s'est développée. De 1920-1921 à 1953-1954, la consommation nationale d'énergie électrique en kilowattheures a augmenté de presque 10 pour cent par an.

Le tableau 3 compare la consommation d'énergie électrique par habitant en Australie à celle de divers autres pays.

Tableau 3

Consommation d'énergie électrique dans divers pays en 1953

Pays	Population (en millions d'habitants)	Énergie électrique consommée pour tous usages (en millions de kWh)	Consommation par habitant (en kWh)
AUSTRALIE . .	8,8	10 949	1 244
États-Unis d'Amérique	159,9	514 920	3 220
Canada	14,7	65 489	4 443
Royaume-Uni . .	49,2	77 300	1 570
France	42,6	41 348	970
Allemagne occidentale	49,2	58 983	1 200
Suède	7,2	22 062	3 070
Inde	372	6 624	18
Japon	86,7	55 704	642
Nouvelle-Zélande .	2,05	3 432	1 674
U.R.S.S.	211	133 000	630

Sources : Economic Commission for Europe, Committee for Electric Power, Doc. EP/82, 28 janvier 1955; U. N. Monthly Bulletin of Statistics, vol. IX, n° 2, février 1955.

Dès le mois de juin 1953, l'ensemble des centrales australiennes disposait d'une capacité suffisante pour faire face à la demande de pointe et les restrictions à la consommation, imposées par la deuxième guerre mondiale, furent supprimées. Le problème n'était cependant pas définitivement résolu. Il fallait remplacer les installations vieillies et à faible rendement, construire de nouveaux bassins de retenue qui puissent fournir aux centrales hydrauliques des réserves suffisantes d'énergie sous la forme d'eau emmagasinée, étendre les réseaux de transmission et construire assez de centrales de réserve pour parer aux arrêts des centrales en acti-

Tableau 4

Production et consommation d'énergie électrique pour chaque État 1951/52 à 1953/54

(En millions de kWh)

États	1951/52		1952/53		1953/54	
	Production	Consommation	Production	Consommation	Production	Consommation
Nouvelle-Galles du Sud .	3 879	3 064	4 201	3 465	4 732	3 864
Victoria	2 852	2 205	3 085	2 380	3 555	2 759
Queensland	1 078	885	1 168	958	1 299	1 083
Australie du Sud	686	566	750	619	865	715
Australie occidentale . .	433	335	460	368	514	404
Tasmanie	1 086	944	1 168	1 002	1 404	1 199
Territoire du Commonwealth	23	58	25	43	28	71
Total pour l'Australie	10 037	8 057	10 857	8 835	12 397	10 095

Source : Electricity Supply Association of Australia, Statistics of the Electricity Supply Industry in Australia.

N. B. — Dans ce tableau n'est comptée que l'énergie électrique produite par des entreprises de production d'électricité; on n'a pas tenu compte de l'énergie produite pour leur compte propre par les établissements industriels.

vité, faire face aux situations décrétées exceptionnelles par les pouvoirs publics et, par dessus tout, pour répondre à la demande toujours croissante d'énergie électrique. Il semble que dans le proche avenir la demande doive s'accroître d'au moins 8 pour cent par an, ce qui obligerait à doubler la capacité des centrales tous les neuf ans.

En vue d'y parvenir, les autorités compétentes ont mis sur pied des programmes de construction qui permettront de mettre à la disposition des réseaux, par fractions échelonnées, plus de 6 millions de kilowattheures d'énergie supplémentaire, et qui étendront dans de nombreuses directions les réseaux de transmission existants.

b) Autorités chargées de l'approvisionnement en énergie électrique

A l'exception du Queensland, chacun des six États australiens a créé un service public chargé de l'approvisionnement en électricité; c'est de lui que relèvent la production et, dans la plupart des cas, la distribution de la majeure partie de l'électricité consommée sur le territoire de l'état intéressé. Dans le Queensland, la production et la distribution sont aux mains d'autorités locales créées en vertu d'une loi de l'État. Il n'y a encore aucune interconnexion entre les réseaux des six États.

Il existe une exception principale à ce régime qui rend les autorités de chaque État responsables de la production : le plan d'équipement hydroélectrique des Snowy Mountains. Ce plan est actuellement exécuté par le Gouvernement du Commonwealth, principalement en vue de fournir l'énergie de pointe aux États de la Nouvelle-Galles du Sud et du Victoria. Le fonctionnement de ce complexe entraînera obligatoirement l'interconnexion des réseaux de Victoria et de la Nouvelle-Galles du Sud.

Le tableau 4 indique la production et la consommation d'électricité de chaque État.

c) Ressources en énergie

La principale source de l'énergie électrique australienne est le charbon dont il y a des réserves très importantes. Sauf en Tasmanie, les forces hydrauliques ne jouent qu'un rôle relativement faible. Le moteur à combustion interne n'intervient pour la production d'électricité que dans de petites centrales d'intérêt local.

Le tableau 5 indique la part respective des centrales à vapeur, hydrauliques et à combustion interne dans la production totale en 1953-1954.

Tableau 5

Nombre de kilowattheures produits en 1953/54

Type de centrale	Millions de kWh	Pour cent
Vapeur	10 282	83
Hydraulique	1 769	14
Combustion interne	347	3
TOTAL	12 398	100

Source : Electricity Supply Association of Australia 1952-1953.

N. B. — Ce tableau ne tient compte que de l'énergie électrique produite par les entreprises de production d'électricité. La production des établissements industriels n'est pas comptée : elle a représenté à elle seule 1 224 millions de kilowattheures.

Le charbon a représenté 96 pour cent du poids total du combustible utilisé en 1953-1954 dans les centrales à vapeur; plus de la moitié de cette quantité était constituée par du lignite de médiocre qualité extrait des vastes gisements de la vallée de Latrobe dans la partie sud-ouest de l'État de Victoria. C'est toutefois le charbon gras des bassins de la Nouvelle-Galles du Sud qui a fourni la plus grande quantité d'énergie.

Le charbon du Queensland est expédié par mer dans l'État de Victoria et celui de la Nouvelle-Galles du Sud est expédié dans les États de Victoria et d'Australie méridionale. Les charbons extraits du sol de ces deux derniers États sont cependant d'un prix de revient inférieur à celui des charbons qu'ils importent du Queensland et de la Nouvelle-Galles du Sud; aussi, en dépit de leur pouvoir thermique moins élevé, les charbons du Victoria et d'Australie méridionale constituent un combustible plus économique lorsqu'il s'agit de produire de la vapeur.

A l'heure actuelle, on utilise surtout le mazout pour amorcer la production de vapeur des chaudières à charbon dans des centrales spéciales de dépannage et compléter le rendement des charbons médiocres, en particulier aux périodes de pointe.

L'énergie hydraulique n'a joué qu'un faible rôle pour la production d'électricité en Australie, car 15 pour cent seulement du continent reçoit des précipitations annuelles supérieures à 75 cm et encore ces précipitations sont-elles essentiellement variables. Aussi la mise en valeur des ressources hydrauliques s'est-elle presque uniquement limitée à la Tasmanie et aux régions montagneuses du sud-est du continent. Les rivières des régions côtières de la Nouvelle-Galles du Sud et du Queensland pourraient certes fournir un certain potentiel hydraulique, mais il ne représenterait, de toute manière, qu'une fraction minime du potentiel de ces régions, qui sont déjà équipées en centrales à vapeur.

La production d'énergie hydraulique en Australie appartient généralement à l'un des deux types suivants :

1. Les ensembles construits uniquement ou essentiellement en vue de la production d'électricité dans des régions possédant les plus grands avantages naturels, par exemple les ensembles de Tasmanie et du Kiewa dans le nord-est de l'État de Victoria;

2. Les ensembles construits à titre complémentaire auprès des réservoirs d'irrigation, par exemple le réservoir de Burrinjuck dans la partie sud-est de la Nouvelle-Galles du Sud et le réservoir d'Eildon dans la partie est de l'État de Victoria.

Le vaste ensemble des Snowy Mountains dans la partie sud-est de la Nouvelle-Galles du Sud est mixte et fournit à la fois de l'énergie et de l'eau d'irrigation.

En Tasmanie, l'eau est la principale source d'énergie; elle suffit à produire le courant de base et le courant de pointe. Sur le continent, les centrales hydrauliques produisent généralement le courant de pointe, alors que le courant de base est fourni par les centrales thermiques. Ceci permet d'exploiter les centrales hydrauliques de façon à produire la capacité maximum compatible avec le débit d'eau disponible, ce qui réduit notablement les mises en marche et les arrêts des générateurs thermiques, opérations qui sont toujours coûteuses.

Dans certains cas, cependant, la centrale hydraulique ne suffit pas complètement à faire face à la charge de pointe. Là où elle constitue un simple complément à un système d'irrigation, elle ne peut produire d'électricité que pendant la période d'irrigation en été, alors que les charges de pointe sont nécessaires en hiver. Mentionnons encore les réservoirs de faible capacité dont le remplissage dépend du débit de la rivière et dont la production d'énergie est surtout fonction des pluies saisonnières.

On pourrait concevoir, parmi les possibilités importantes que réserve l'avenir, la transmission de l'énergie hydraulique produite en Nouvelle-Guinée au moyen d'un câble souterrain raccordé au réseau du Queensland; mais nous n'avons pas tenu compte de cette possibilité dans le présent rapport.

Partie B. — Le but de ce rapport et la méthode suivie

Nous nous proposons d'étudier ici les besoins probables auxquels la production australienne d'énergie électrique devra faire face au cours du prochain demi-siècle. Nous essaierons d'évaluer dans quelle mesure les ressources fondamentales du pays pourront suffire à assurer la fourniture de courant.

Notre but est de présenter, dans la mesure du possible, un tableau des conditions générales qui permette de voir s'il serait opportun d'utiliser de l'énergie atomique en Australie au cours des cinquante prochaines années. Nous aurons ainsi à répondre aux questions suivantes :

1. Quelle sera la quantité d'énergie nécessaire pendant ce demi-siècle ?

2. Dans quelle mesure cette demande pourra-t-elle être satisfaite à l'aide des sources de production déjà reconnues ?

3. Quel sera l'ordre de grandeur probable de ces sources déjà reconnues ? (En examinant cette question, nous supposerons pour plus de commodité que le niveau général des prix demeurera constant pendant toute la période considérée. La plus ou moins grande exactitude de cette hypothèse n'affecte nullement les réponses aux questions posées, celles-ci étant essentiellement déterminées par l'interdépendance des facteurs en cause.)

Les besoins futurs en énergie électrique sont très étroitement liés au développement général de l'économie, à l'apparition de techniques nouvelles dans l'industrie, aux changements qui se produisent dans les conditions sociales et à l'évolution des modes de vie. Il va de soi qu'aucun de ces éléments

ne peut faire l'objet de prévisions même approximatives, à cinquante ans de distance. Il est donc impossible de prévoir à coup sûr le mode d'accroissement des besoins en énergie électrique. Si toutefois nous supposons (et ce faisant nous croyons, ou tout au moins nous espérons, que les événements nous donneront raison) que le demi-siècle à venir ne sera pas marqué par des catastrophes d'ordre technique, social ou politique de nature à modifier radicalement l'étude des besoins en énergie toujours plus considérables d'une société en plein développement, nous pourrons peut-être définir avec une sûreté relative les *quantités maxima* d'énergie qu'il semblerait raisonnable de prévoir pour faire face aux besoins de ces cinquante ans. C'est seulement dans ces limites que nous nous proposons de répondre à ces questions.

Dans un certain nombre de pays et pendant des périodes de longueur diverse, la demande d'énergie électrique s'est accrue à un taux variant de 7 à 10 pour cent par an. En Australie, le taux actuel paraît être d'environ 9 pour cent par an. Un tel développement entraîne de très lourds investissements sous forme de biens d'équipement à produire et à amortir, et suffirait en lui-même à rendre peu probable un accroissement ultérieur de ce taux au cours d'une période de quelque durée. Mais nous avons aussi certaines raisons d'escompter que ce taux d'accroissement tendra à s'abaisser avec les années. L'une d'elles nous est fournie par l'examen des courbes du taux d'accroissement de la production d'électricité dans divers pays, et notamment dans ceux qui en sont, depuis longtemps, de gros consommateurs : elles expriment une nette tendance à la baisse. D'autre part, les quantités totales d'énergie utilisée s'accroissent à un rythme sensiblement plus lent que les quantités d'électricité utilisée. A mesure qu'augmente la proportion d'électricité dans la quantité d'énergie utilisée, son taux d'accroissement doit se rapprocher du taux global d'accroissement de l'énergie utilisée sous toutes les formes. Enfin, pour ce qui est du courant à usage domestique, il semble que la consommation approchera du point de saturation lorsque presque tous les foyers seront équipés des appareils électriques ménagers qui peuvent y trouver place. La consommation n'atteindra peut-être jamais un maximum absolu, mais doit s'en approcher dans de nombreux pays à niveau de vie élevé. On peut également noter que la baisse du prix de revient de l'électricité, qui a joué un rôle important dans cet accroissement rapide de son utilisation, ne semble pas devoir se poursuivre indéfiniment au même rythme.

On peut donc définir avec une précision suffisante les maxima qu'atteindra la demande globale d'énergie électrique pendant les cinquante prochaines années, réserve faite, bien entendu, des catastrophes auxquelles nous avons fait allusion plus haut. L'établissement de ces chiffres est fondé sur l'hypothèse que le développement général de l'économie australienne se poursuivra au rythme rapide qui a été le sien entre 1945 et 1955.

Nous prévoyons donc, en particulier, un taux élevé d'accroissement de la population. Le chiffre élevé qui figure au tableau 2 et indique la migration nette entre 1947 et 1954, traduit la politique d'immigration du Gouvernement australien, qui vise à stimuler l'afflux des immigrants et à faciliter leur assimilation. Le chiffre, élevé lui aussi, qui exprime l'accroissement naturel de la population, est fonction de la prospérité économique qui règne depuis 1946. Si la population de l'Australie continue de s'accroître à raison de 2,45 pour cent par an, elle atteindra, dans cinquante ans, le chiffre de 30 millions. Nous avons raisonné ici sur un chiffre de 25 à 30 millions.

Entre 1946-1947 et 1953-1954 le montant réel de la production nationale brute en Australie a augmenté d'environ 4 pour cent par an. Nous avons supposé qu'une augmentation du même ordre se poursuivrait, avec tout ce qu'elle implique quant à la demande de biens et de services.

Dans les domaines où cette hypothèse se justifie, nous avons également supposé que certaines techniques encore imparfaites se perfectionneraient, amenant une demande supplémentaire d'énergie. C'est ainsi qu'une étude des besoins en lignite de l'État de Victoria nous a amené à considérer que le nombre des locomotives propulsées par turbine à gaz chauffée au lignite pulvérisé sera tel que, vers la fin du siècle, le réseau ferroviaire de l'État de Victoria utilisera presque exclusivement le lignite.

C'est ainsi qu'en citant des niveaux théoriques de besoins en énergie, nous pensons à des possibilités ou à des probabilités vraisemblables plutôt que d'essayer de deviner quelle sera effectivement la situation. L'avantage de cette méthode devrait être de pouvoir déterminer s'il est raisonnable de s'attendre à rencontrer une conjoncture où l'énergie électronucléaire aurait sa place, et, dans l'affirmative, quelle pourrait être cette place.

Étant donné qu'en Australie la fourniture et la consommation d'électricité sont organisées suivant une structure propre à chaque État (remarque également valable pour l'ensemble de l'économie australienne), les problèmes soulevés seront étudiés état par état, car ils se posent en effet de manière très différente pour chaque état. Nous avons néanmoins tenu compte des possibilités d'échange d'énergie ou de sources d'énergie d'un État à l'autre.

Il n'est peut-être pas inutile d'exposer de manière plus détaillée le mode de raisonnement que nous suivrons dans cette étude. En premier lieu, nous avons déterminé pour les cinquante prochaines années les besoins en énergie électrique de chaque état; nous avons donc extrapolé les taux annuels d'accroissement de la demande en supposant une diminution, d'ailleurs tout à fait arbitraire. Nous avons ensuite exprimé cette extrapolation sous forme de la totalité d'énergie requise pour la production de cette énergie électrique. Nous y avons ajouté certaines évaluations des charges auxquelles les sources d'énergie existantes devront

probablement faire face à d'autres fins que la production d'électricité; ces charges ont été évaluées de manière aussi élevée que possible. Le total ainsi obtenu est comparé aux réserves globales de charbon ou de potentiel hydraulique connues; cette comparaison devrait permettre de déterminer la suffisance ou l'insuffisance des ressources et la tendance probable de leur coût d'utilisation. Toutefois, il ne paraît guère justifié de tirer des conclusions quant aux ressources elles-mêmes, sauf si ces dernières excèdent très largement les besoins.

En réalité, dans la discussion qui va suivre, nos conclusions principales sont totalement indépendantes de l'hypothèse selon laquelle l'immigration et le développement économique se poursuivront à une cadence rapide; car ces hypothèses (à moins qu'elles ne pêchent pas par excès de modestie) contiennent en elles-mêmes les arguments les plus forts pour combattre les propositions découlant de nos conclusions principales. En refusant d'accepter ces hypothèses, on ne ferait donc que fonder ces conclusions sur une base encore plus ferme.

Nous pouvons dès à présent traiter une fois pour toutes d'une question particulière, à savoir l'avenir du fuel-oil dans la production d'électricité en Australie. Le développement qu'a pris l'industrie australienne du raffinage du pétrole permet de croire qu'à un moment ou à un autre la production d'électricité pourra utiliser certaines quantités de fuel-oil qui lui seront offertes à des prix soutenant la concurrence du charbon. Une telle concurrence serait possible, puisque le fuel-oil est un sous-produit du raffinage et que le seul élément déterminant de la fixation de son prix est la nécessité de lui trouver preneur. Mais plus on approchera de la fin du siècle, moins on aura de chances de voir se produire une telle situation, en raison de l'accroissement de la demande d'autres produits pétroliers, tels que l'essence d'automobile et le carburant d'aviation. Étant donné l'importance des réserves de pétrole connues, l'effet de cette demande sera sans doute de porter à un niveau assez élevé les prix des produits pétroliers les plus lourds; l'industrie aura donc toujours plus d'intérêt à les vendre sous cette forme qu'à en tirer des produits plus volatils par craquage.

Étant donné ce qui précède, c'est seulement pour l'Australie méridionale et l'Australie occidentale qu'il a paru utile de mentionner expressément le fuel-oil dans l'exposé des conditions financières de la production d'électricité à partir de tel ou tel combustible.

CHAPITRE II. — LES PERSPECTIVES DE 1955 A 2004

Partie A. — Analyse de la situation dans les différents États

Nouvelle-Galles du Sud, Victoria et Queensland

La Nouvelle-Galles du Sud, le Victoria et le Queensland contiennent, à eux trois, 80 pour cent de la population de l'Australie et réunissent 84 pour cent de toutes les industries de transformation. Ces trois États possèdent des réserves de charbon qui doivent pouvoir suffire aux besoins en chaleur et en énergie des cinquante prochaines années, le courant électrique étant produit à des prix soit inférieurs, soit légèrement supérieurs aux prix actuels.

Dans la Nouvelle-Galles du Sud, l'ensemble des besoins en énergie électrique des cinquante prochaines années a été évalué, sur le plan théorique, par la Direction de l'Électricité de cet État, à environ 1 800 millions de mégawattheures; les forces hydrauliques devraient fournir environ 190 millions de mégawattheures. La production des 1 610 millions de mégawattheures restants absorberait 650 millions de tonnes de charbon de la Nouvelle-Galles du Sud (voir annexe 5).

Cette précision part de l'hypothèse que le taux annuel d'accroissement de la demande d'énergie électrique diminuera de son taux actuel de 9 pour cent à un taux approximatif de 2,5 pour cent par an; il se peut que cette estimation soit trop basse. En adoptant l'hypothèse opposée et en admettant que la demande d'électricité poursuive régulièrement, pendant ces cinquante années, sa marche ascensionnelle à raison de 9 pour cent d'accroissement par an, on aboutirait à un besoin total, en énergie, de 4 500 millions de mégawattheures pour la période considérée, impliquant la consommation de 1 600 millions de tonnes de charbon environ.

Aux besoins en charbon de la Nouvelle-Galles du Sud impliqués par la production d'énergie électrique dans cet État, nous pouvons ajouter les besoins suscités par d'autres utilisations. Il ne sera pas nécessaire ici de chercher à évaluer ces besoins avec précision; il nous suffira d'énoncer les chiffres les plus élevés que ces besoins semblent devoir atteindre.

La sidérurgie est l'autre grosse consommatrice potentielle de charbon de Nouvelle-Galles du Sud. En supposant que la sidérurgie australienne se développe exclusivement en Nouvelle-Galles du Sud, et qu'elle puisse satisfaire la totalité des besoins futurs du continent, on peut estimer qu'elle produirait, en l'an 2004, une quantité d'environ 30 millions de tonnes d'acier en lingots par an. Pour fabriquer cet acier, il faudrait consommer environ 1 milliard de tonnes de charbon de Nouvelle-Galles du Sud.

Les autres besoins de la consommation dans la Nouvelle-Galles du Sud pourraient être évalués au maximum à 750 millions de tonnes (voir annexe 1); en outre, 200 millions de tonnes pourraient être exportés en Australie méridionale.

Il résulte de tout ceci que les besoins maxima en charbon de la Nouvelle-Galles du Sud semblent raisonnablement devoir être les suivants, pendant cette période de cinquante ans :

	En millions de tonnes
Production électrique	1 600
Production d'acier	1 000
Autres utilisations	750
Exportations vers l'Australie méridionale	200
	3 350

Les réserves de houille effectives et probables de la Nouvelle-Galles du Sud, sont estimées à 11 milliards de tonnes. Les trois quarts de ces réserves devraient, semble-t-il, se prêter à l'extraction. Il y a lieu d'ajouter que leur montant a été calculé sur la base de relevés géologiques portant sur 2 pour cent environ des régions probablement carbonifères de l'État, et sur des forages isolés effectués dans le reste de ces régions.

En ce qui concerne l'État de Victoria et en supposant que la demande d'énergie électrique s'accroisse de 9 pour cent par an pendant les dix premières années, de 8 pour cent pendant les dix années suivantes, de 7 pour cent pendant la troisième décennie et de 6 pour cent ensuite, le total des besoins pourrait être évalué à 1 500 millions de mégawattheures pendant ces cinquante ans. Il ne paraît pas impossible que cette évaluation soit insuffisante, et en tenant compte des chiffres que nous avons avancés pour la Nouvelle-Galles du Sud, il serait peut-être raisonnable d'estimer à 3 milliards de mégawattheures au maximum le total des besoins de l'État de Victoria. Il ne semble pas que les ressources hydrauliques puissent fournir plus de 100 millions de mégawattheures. En supposant que toute l'énergie supplémentaire doive être produite à l'aide du lignite de la vallée de Latrobe, sur la base de 4 livres (1,892 kg) de charbon brut par kilowattheure d'énergie produite, la consommation totale de lignite entraînée par la production d'électricité pendant ces cinquante années serait de 5 400 millions de tonnes.

Il serait sans doute raisonnable d'ajouter à ce chiffre un maximum de 1 500 millions de tonnes affectées à d'autres utilisations. On verra à l'annexe 2 comment nous sommes parvenus à ce chiffre. Le total général de 7 milliards de tonnes peut être mis en balance avec l'estimation des réserves de lignite de la vallée de Latrobe, soit 31 000 millions de tonnes à une profondeur moyenne de 0 à 100 pieds (0 à 35 m). Les réserves sont donc amplement suffisantes.

Au cours de ces cinquante années, il est bien possible que le Queensland se développe plus vite qu'aucun autre État. La commission de l'électricité de l'État de Queensland a établi des prévisions théoriques, d'après une comparaison internationale de l'utilisation de l'électricité par habitant et une extrapolation de l'accroissement de la population : elle évalue à 12 500 millions le nombre de kilowattheures dont le Queensland aura besoin en 2004. Ce chiffre impliquerait un accroissement annuel légèrement supérieur à 5 pour cent pendant cinquante ans, mais il ne serait pas surprenant qu'une telle prévision péchât par excès de modestie.

Cherchant à considérer un chiffre « maximum » et supposant que les besoins annuels, qui sont actuellement d'environ 1 100 millions de kilowattheures s'accroîtront chaque année de 9 pour cent, nous aboutirons à un chiffre annuel de 80 milliards de kilowattheures en 2004, ou de 900 millions de mégawattheures pour toute la période de cinquante ans considérée.

Les ressources hydrauliques du Queensland ne pourraient guère fournir plus de 50 millions de mégawattheures au total pendant ce demi-siècle. La différence pourrait être comblée à l'aide de 350 millions de tonnes de charbon (d'une qualité fournissant environ 4 000 kilocalories à la livre).

Le Queensland pourrait être le siège d'une industrie sidérurgique de première importance qui absorberait peut-être 350 millions de tonnes de charbon. Pour toutes les autres utilisations du charbon, il semble qu'une prévision d'environ 250 millions de tonnes soit largement suffisante. Ces divers postes ajoutés l'un à l'autre représentent un total inférieur à 1 milliard de tonnes. Il faut également prévoir la possibilité d'exporter une certaine quantité de ce charbon.

Les réserves de charbon effectives et probables du Queensland sont de l'ordre de 2 milliards de tonnes. D'autre part, le réseau de distribution principal de cet État sera certainement lié au réseau de la Nouvelle-Galles du Sud dans quelques années, et on pourrait alors faire appel à l'énergie électrique de la Nouvelle-Galles du Sud pour suppléer aux insuffisances qui apparaîtraient dans le Queensland. On peut en conclure que les vastes bassins miniers du Queensland et de la Nouvelle-Galles du Sud suffiront à faire face aux besoins en énergie et en chaleur de ces deux États pendant les cinquante prochaines années.

Dans la Nouvelle-Galles du Sud, la tendance actuelle des coûts de production de l'électricité est à la baisse. Les nouvelles centrales qui se construisent ont un rendement supérieur à celui des anciennes et, de plus en plus souvent, les centrales sont construites à proximité immédiate de la mine, ce qui réduit au minimum les frais de transport. Enfin, le coût de production moyen du charbon au carreau des mines pourra fort bien baisser d'un tiers dans les dix années à venir, lorsque la mécanisation des mines de la Nouvelle-Galles du Sud sera terminée.

La direction de l'électricité de la Nouvelle-Galles du Sud a fait l'évaluation suivante du prix de revient du kilowattheure aux bornes des centrales à vapeur chauffées au charbon, dans les conditions qui prévaudront d'ici vingt ans, par exemple. (Pour le calcul de ces prix et d'autres calculs analogues cités dans le présent rapport, on a admis que les niveaux généraux des prix resteront inchangés par rapport à 1955.)

Intérêt et fonds d'amortissement . . .	0,23 penny
Fonctionnement et entretien	0,06 penny
Combustible	0,31 penny
	0,60 penny

Les éléments sur lesquels s'appuient ces évaluations sont cités à l'annexe 3. Le prix du charbon est censé être le prix actuel.

En outre, la direction de l'électricité fait observer que le coût du kilowattheure devrait être, d'ici vingt ans, légèrement inférieur au coût moyen actuel, en tout cas pour les centrales qui pourront fournir le courant de base aux meilleures conditions.

Dans l'État de Victoria, le coût du kilowattheure, calculé aux bornes des centrales entrant actuellement en activité et chauffées au lignite, se situe aux environs de 0,6 à 0,7 penny. A l'heure qu'il est, sur une production annuelle totale d'environ 3 502 millions de kilowattheures, 1 394 sont produits à proximité immédiate des mines de lignite. Il est probable qu'à long terme, on produira 70 pour cent au moins de l'énergie totale dans les mêmes conditions. Les centrales fournissant le courant de base devraient à ce moment-là parvenir à un prix de revient égal ou inférieur à 0,6 penny le kilowattheure, mais seront situées dans la vallée de Latrobe, à 70 milles (110 km) environ du principal centre de consommation qu'est Melbourne.

La part du charbon dans le coût de production de l'énergie électrique ne devrait sensiblement augmenter ni dans la Nouvelle-Galles du Sud, ni dans le Victoria, au cours de ces cinquante ans, en raison des difficultés croissantes d'accès aux gisements de charbon.

Australie méridionale

Au cours du prochain demi-siècle, il est probable que l'Australie méridionale continuera de faire appel à des sources autres que son propre charbon pour assurer la plus grande partie de sa production d'énergie et de chaleur. La capacité de production actuelle des centrales de cet État est de 228 mégawatts. Vers 1961, elle sera portée à 510 mégawatts dont 270 seront produits à la centrale de Port Augusta. Celle-ci utilisera du charbon d'Australie méridionale extrait du gisement à ciel ouvert de Leigh Creek. On évalue le contenu de ce gisement à 55 millions de tonnes pouvant être extraites à ciel ouvert, équivalant en qualité à environ 27 millions de tonnes de charbon de Nouvelle-Galles du Sud. La capacité de production de Port Augusta a été calculée de manière à épuiser complètement ces 55 millions de tonnes en l'espace d'environ quarante ans, durée de vie totale envisagée pour la centrale. Reste toutefois la possibilité d'utiliser du charbon de Leigh Creek, extrait de mines souterraines. Les autres gisements de charbon que l'on connaît actuellement en Australie méridionale sont très peu importants ou de valeur douteuse.

Actuellement, le solde des besoins de combustibles de l'Australie méridionale est fourni par le charbon de Nouvelle-Galles du Sud, dont 300 000 tonnes environ sont importées chaque année.

Nous avons établi à l'annexe 4 une estimation des besoins de l'Australie méridionale en énergie électrique pendant cette période de cinquante ans. Nous avons supposé que ces besoins augmentaient de 9 pour cent par an pendant la première décennie, de 8 pour cent pendant la deuxième décennie, de 7 pour cent pendant la troisième et de 6 pour cent par la suite.

Nous obtenons ainsi pour les cinquante années une évaluation des besoins totaux égale à 425 millions de mégawattheures, dont le gisement à ciel ouvert de Leigh Creek devrait fournir 60 millions. Les 365 millions de mégawattheures restants pourraient être produits au moyen de 150 millions de tonnes de charbon de la Nouvelle-Galles du Sud.

Il n'est pas impossible que l'industrie de raffinage du pétrole prenne en Australie méridionale une extension suffisante pour mettre à la disposition du marché un excédent de fuel-oil qui, sur une période de vingt ans par exemple, suffirait à produire environ 26 millions de mégawattheures. La situation de l'Australie méridionale lui permet également de recevoir sans difficulté un excédent possible de fuel-oil provenant des raffineries d'Australie occidentale.

On peut considérer que les réserves totales de charbon effectives et probables de l'Australie méridionale, mis à part le gisement à ciel ouvert de Leigh Creek, équivalent à environ 240 millions de tonnes de charbon de la Nouvelle-Galles du Sud. Certaines de ces réserves seront toutefois d'une exploitation très difficile et aucune d'entre elles ne produira de charbon à un coût aussi bas que le gisement à ciel ouvert de Leigh Creek. On peut estimer à 50 millions de tonnes environ (en équivalent de charbon de la Nouvelle-Galles du Sud) les besoins autres que la production d'électricité auxquels ces réserves devront faire face pendant le prochain demi-siècle. Dans l'hypothèse même où ces réserves seraient exploitées intensivement, le bilan charbonnier de l'avenir pourrait s'établir à peu près comme suit :

	En millions de tonnes de charbon d'une qualité équivalente à celle de la Nouvelle-Galles du Sud
Réservé pour la centrale de Port Augusta	27
Autre production d'électricité	150
Autres utilisations	50
Total des besoins	227
Réserves	200 à 240
Soit en moins	27
Ou en plus	13

Ces chiffres « 27 » et « 13 » n'ont aucune signification absolue et servent surtout à indiquer à quel point la marge prévue sera étroite. Dans ces conditions, il est peu probable que l'Australie méridionale essaie de suivre une politique d'autarcie en matière de charbon; on peut supposer, au contraire, qu'elle fera appel dans une très large mesure à d'autres sources d'énergie.

En dehors de son propre charbon et de l'appoint que lui fourniront éventuellement les raffineries de pétrole, l'Australie méridionale pourrait encore s'adresser à un certain nombre d'autres sources pour faire face à la totalité ou à une partie de ses besoins en énergie. Citons parmi ces sources : 1) le charbon de la Nouvelle-Galles du Sud importé par voie de mer; 2) les briquettes provenant de l'État de Victoria; 3) le charbon expédié par voie fluviale (Murray) du bassin d'Oaklands-Coorabin [les réserves probables ont été évaluées à 800 millions de tonnes, d'une valeur calorifique de 9 500 Btu (2 400 kcal) par livre]; 4) l'énergie électrique importée du Victoria par réseau terrestre; 5) l'énergie éolienne (l'Australie méridionale a en cours un programme d'étude des vents); 6) l'énergie atomique.

Il est naturellement impossible de prévoir la mesure dans laquelle ces diverses sources seront mises à contribution. La considération dominante sera nécessairement l'étude comparée des prix de revient. Dans la mesure où ceux-ci seront à peu près équivalents, les pouvoirs publics s'adresseront vraisemblablement à des sources variées.

Actuellement, le prix du charbon de la Nouvelle-Galles du Sud rendu en Australie méridionale est de 6 livres sterling la tonne, prix que les progrès des transports maritimes pourraient faire baisser. Ce prix élève à 0,8 penny par kilowattheure la part moyenne représentée par le combustible dans le coût de l'électricité produite par le charbon de la Nouvelle-Galles du Sud; le taux de rendement dudit combustible est ainsi de 24 pour cent. (Le charbon de Leigh Creek permettrait d'arriver à un prix de 0,5 penny par kilowattheure, mais il semble que le coût total de l'utilisation de ce dernier charbon soit un peu plus élevé.) Actuellement, le prix de revient global de l'électricité produite en Australie méridionale est d'environ 1,5 penny le kilowattheure au coefficient de charge du réseau, c'est-à-dire environ 50 pour cent. Ce prix pourrait être abaissé à environ 0,9 penny le kilowattheure en utilisant pour la production électrique le charbon de la Nouvelle-Galles du Sud, compte tenu des améliorations futures du rendement, même si le prix actuel du charbon de la Nouvelle-Galles du Sud rendu en Australie méridionale se maintenait à son niveau actuel.

Tasmanie

Le potentiel hydraulique de la Tasmanie doit suffire à assurer sa production d'énergie électrique jusqu'en 1985 environ. La Commission d'hydro-électricité de Tasmanie a procédé à des évaluations théoriques à longue échéance de la charge de pointe et de la charge moyenne de son réseau, comme suit :

Année	*Pointe* MW	*Moyenne* MW	MWh par année
1955	350		
1958	416	264	2,3 millions
1965	699	411	3,6 millions
1970	956	540	4,7 millions
1975	1 326	723	6,3 millions

Le Président de la Commission a exprimé l'avis suivant : « ... Lorsque les sites hydrauliques les plus favorables seront tous en exploitation, il vaudra la peine, dans un avenir plus ou moins éloigné, d'installer en Tasmanie une production thermique de complément, mais ce ne sera sans doute pas avant longtemps. »

Cette même personnalité a évalué le développement maximum que connaîtront probablement les centrales hydrauliques en Tasmanie et l'a estimé à 1 300 mégawatts de production moyenne. Ce chiffre représente environ 11 millions de mégawatt-heures par an, soit à peu de chose près la consommation à laquelle le réseau tasmanien devrait faire face aux environs de 1985, d'après la prévision citée plus haut. Il paraît donc probable qu'aux environs de 1970 la Tasmanie devra se préoccuper de compléter par des fournitures d'appoint sa production d'énergie hydraulique.

Au moment où cet appoint deviendra nécessaire, il est probable que le taux d'accroissement de la demande aura passablement diminué. Le coût de production de l'électricité à partir des forces hydrauliques en Tasmanie ne dépasse pas 0,3 ou 0,4 penny le kilowattheure. C'est le prix le plus bas de l'Australie, et le développement industriel de la Tasmanie est dû en grande partie à ces conditions favorables.

La Tasmanie possède certaines ressources charbonnières : celles de ses réserves probables qui seraient économiquement exploitables ont été évaluées à 244 millions de tonnes d'un charbon de qualité généralement inférieure à celui de la Nouvelle-Galles du Sud. L'industrie charbonnière ne s'est que peu développée en Tasmanie : la prédominance de l'énergie hydraulique et plus récemment l'adoption de la traction diesel pour les chemins de fer en ont freiné l'expansion.

Il est sans doute beaucoup trop tôt pour se demander si les ressources propres de la Tasmanie en charbon lui permettront de compléter ses ressources en énergie jusqu'en 2004; dans la mesure où elles n'y suffiraient pas, la Tasmanie pourra choisir entre deux solutions : importer du charbon de la Nouvelle-Galles du Sud ou des briquettes du Victoria, ou produire de l'énergie électronucléaire. Il y aurait encore la possibilité de relier, par câble sous-marin, la Tasmanie au réseau du Victoria, solution qui présenterait l'avantage de combiner la production d'énergie hydraulique de la Tasmanie et la production d'énergie thermique du Victoria.

Australie occidentale

En 1954, les principales centrales d'Australie occidentale ont distribué au total 514 000 kilowatt-heures d'énergie électrique, produits à l'aide de charbon d'Australie occidentale du bassin de Collie. Si l'on évalue les besoins de cet État en énergie électrique pendant les cinquante années à venir, selon les critères qui ont déjà servi pour l'Australie méridionale, on aboutit à une demande totale de

268 millions de mégawattheures d'énergie qui absorberont 110 millions de tonnes de charbon du bassin de Collie (à raison de 1,3 livre par kilowattheure).

On évalue à plus de 1 500 millions de tonnes les réserves du bassin de Collie. Le fuel-oil produit à la raffinerie de Fremantle pourrait, par la suite, jouer un rôle secondaire mais indiscutable dans la production d'énergie électrique de l'Australie occidentale.

Partie B. — Quelques considérations générales

Il n'est pas exclu que l'Australie tente de tirer parti de l'énergie nucléaire. Sa décision à cet égard ne dépendra pas seulement des prix comparés de la production d'électricité à partir de la fission nucléaire ou d'autres sources; elle sera aussi influencée par d'autres considérations qui ne sont pas toutes de caractère économique, par exemple :

1. *Montant des investissements financiers requis par les installations.* Actuellement, l'Australie est un pays en quête de capitaux et elle continuera très probablement à l'être si la cadence de son développement se maintient (sans d'ailleurs que le taux d'intérêt soit forcément affecté par ce besoin de capitaux). De ce fait, si le coût de construction des centrales électronucléaires devait s'élever aux environs de 150 livres sterling par kilowatt, alors qu'une centrale thermique à charbon ne reviendrait qu'à 80 livres par kilowatt, les autorités australiennes préféreraient sans doute consacrer les capitaux disponibles à la construction de centrales à charbon, quand bien même le prix de revient final du courant produit, compte tenu du taux d'intérêt en vigueur, dépasserait quelque peu celui des centrales électronucléaires. (Mais de toute manière, même si l'on ne construit pas de centrales électronucléaires, la proportion des investissements nationaux qui devra être consacrée à l'expansion de la production d'électricité augmentera sans doute notablement dans les années à venir.)

2. *Conséquences sociales de la politique charbonnière australienne.* L'industrie charbonnière de la Nouvelle-Galles du Sud emploie environ 20 000 hommes pour extraire quelque 15 millions de tonnes de charbon par an. En Australie, comme partout ailleurs, cette industrie a vu se poser des problèmes de relations particulièrement délicats au sein des entreprises. Il semble que ces problèmes soient maintenant en voie d'être réglés de façon satisfaisante, mais leur existence seule suffit à faire douter de la sagesse d'une solution qui consisterait à trop augmenter la proportion des mineurs dans la collectivité. D'ailleurs, il serait probablement très difficile de recruter un nombre suffisant de mineurs supplémentaires.

3. Une autre considération est celle des *liens de dépendance entre États.* Pour tout ce qui n'est pas du domaine constitutionnel où le Parlement du Commonwealth est compétent, les États australiens sont souverains. Comme ils ont assumé la responsabilité de la fourniture d'énergie électrique dans les limites de leurs territoires respectifs, ils préféreront naturellement que le fonctionnement de leurs réseaux soit assuré indépendamment de ressources extérieures à leurs territoires. Cette tendance naturelle a certainement été renforcée par les événements survenus entre 1940 et 1950, période au cours de laquelle la pénurie de charbon de la Nouvelle-Galles du Sud a sérieusement entravé l'économie des États tributaires de cette source d'approvisionnement. Aussi, à moins qu'un changement profond ne marque l'évolution des relations politiques internes en Australie au cours du prochain demi-siècle, il faut supposer que les autorités chargées de l'électricité dans chaque État témoigneront d'une préférence marquée pour la mise en valeur des sources d'énergie situées sur leurs territoires respectifs. C'est là un des motifs auxquels a obéi l'État de Victoria lorsqu'il a marqué sa volonté d'exploiter les gisements de lignite de la vallée de Latrobe. Lorsque l'Australie méridionale devra faire son choix entre les diverses sources d'énergie dont elle pourra disposer, il y aura certainement là, pour elle aussi, une considération importante.

La possibilité de tirer parti de l'énergie électronucléaire dans les régions très éloignées des principaux centres de production de l'électricité sera jugée selon des critères particuliers. Parmi les considérations techniques préalables, la première sera de savoir s'il est possible et rentable de construire des centrales électronucléaires de capacité relativement faible. On ne pourra cependant y répondre sans examiner en même temps une autre considération préalable, d'ordre technique elle aussi, à savoir la tendance du coût de transmission de l'énergie électrique, mesurée de décennie en décennie. Les distances qui séparent les centres principaux du continent australien pourraient, si les conditions techniques préalables étaient réalisées de façon satisfaisante, ouvrir des perspectives intéressantes à l'utilisation de l'énergie électronucléaire dans les régions isolées de l'Australie.

Ces régions sont, d'une manière générale, de deux catégories : soit des mines ou des centres dont les industries extractives sont l'unique activité et qui sont isolés; soit des villes ou des régions isolées qui ne sont ni particulièrement ni exclusivement consacrées aux industries extractives.

Dans la première catégorie, citons parmi les villes ou les agglomérations qui pourraient éventuellement tirer un parti intéressant de petites génératrices nucléaires :

Kalgoorlie (or)
Broken Hill (argent, plomb, zinc)
et Mount Isa (plomb, zinc et cuivre)

Des centres miniers de ce genre peuvent souvent avoir un important besoin d'énergie.

Darwin, Alice Springs, Derby, Wyndham et la région de Geraldton sont autant d'exemples de villes et de régions isolées appartenant à la deuxième catégorie.

La plupart de ces localités sont actuellement approvisionnées en électricité par des centrales au fuel. Beaucoup d'entre elles pourraient sans doute connaître un développement important au cours du prochain demi-siècle, mais, dans bien des cas, elles ne disposent que de ressources limitées en eau et si le fonctionnement d'une centrale électronucléaire devait requérir d'importantes quantités d'eau, cette exigence à elle seule suffirait à en exclure la possibilité.

S'il devenait un jour réalisable, d'un point de vue économique et technique, d'utiliser l'énergie nucléaire pour produire de très faibles quantités d'électricité, de l'ordre de quelques centaines de kilowatts par exemple, un grand nombre de petits centres situés pour la plupart dans la partie occidentale de la Nouvelle-Galles du Sud et dans le Queensland qui, à présent produisent leur électricité dans des centrales au fuel-oil, pourraient installer de très petites centrales électronucléaires. Il s'agit essentiellement de centres ruraux et il ne semble pas que leur population doive sensiblement s'accroître.

Dans tout ce qui précède, nous n'avons pas tenu compte des utilisations éventuelles de l'énergie nucléaire comme force motrice des véhicules terrestres, des aéronefs ou des navires. Il ne semble pas qu'il y ait dans ce domaine de considérations particulières à l'Australie, mis à part les coûts relativement élevés des transports et le niveau assez élevé des investissements qu'ils exigent, caractéristique inévitable d'un pays à population clairsemée.

RÉSUMÉ

L'essentiel des besoins de l'Australie en énergie pendant les cinquante prochaines années pourrait largement être assuré à l'aide de ses ressources charbonnières, vu l'accès aisé de ce combustible à des coûts réels inférieurs ou à peine supérieurs aux coûts actuels. Les réserves de charbon de l'Australie sont si importantes qu'il ne sera sans doute pas nécessaire d'exploiter totalement les principaux gisements au cours du demi-siècle à venir.

A moins que le coût de production de l'énergie électronucléaire ne s'abaisse au dessous de celui de l'électricité produite dans les centrales thermiques chauffées au charbon, on n'envisagera la création de centrales électronucléaires, au cours des cinquante prochaines années, que dans les régions éloignées de la grande zone où sont concentrés les gisements de charbon, la population et l'industrie; cette zone s'étend le long de la frange sud-orientale du continent. Une ou deux des régions qui en sont éloignées sont des États dotés d'un important réseau de centrales interconnectées et dont les besoins en énergie s'élèvent à des centaines de mégawatts; d'autres, en raison de leur dimension, n'auraient besoin que de quelques milliers de kilowatts. Mais, dans les unes comme dans les autres, il s'agira de choisir entre les arguments économiques qui militeront en faveur de l'énergie électronucléaire et les arguments économiques et politiques qui inciteraient les pouvoirs publics à s'appuyer exclusivement sur les ressources offertes par la zone de concentration de l'industrie.

ANNEXE 1

Nouvelle-Galles du Sud
Consommation maximum de charbon raisonnablement prévisible de 1955 à 2004

Pour toutes utilisations autres que la production d'énergie ou la fabrication d'acier

(En milliers de tonnes)

	Niveau actuel approximatif	Niveau en 2004	Explications	Total des besoins pour les 50 années
Industries (autres que la sidérurgie)	1 800	12 600	[a]	270 000
Gaz	900	1 500	[b]	60 000
Chemins de fer .	1 400	3 500	[c]	75 000
Charbon de soute	300	Néant	—	Négligeable
Combustible synthétique liquide	Néant	18 000	[d]	300 000
Usage domestique	450	2 000	[e]	50 000
TOTAUX . . .	4 850	37 600	—	755 000

[a] Multiplié par 7, coefficient probable d'expansion du produit national brut réel.

[b] Ramené à 500 000 tonnes pour tenir compte du remplacement par le gaz de pétrole; puis multiplié par 3 pour tenir compte de l'accroissement de la population.

[c] Pendant la plus grande partie de la période considérée, les locomotives seront vraisemblablement chauffées au mazout naturel, puis synthétique. La demande de charbon ne diminuera sans doute que lentement et très progressivement; il faut également tenir compte du développement que connaîtront les locomotives à turbine à gaz chauffées au charbon pulvérisé.

	En milliers de tonnes
Baisse très progressive de la demande de charbon pour la chauffe des locomotives	14 000
Baisse de la demande de charbon provoquée par l'utilisation de plus en plus répandue de la turbine à gaz	60 000
TOTAL . . .	74 000

[d] On a supposé que, vers 1975, il deviendra rentable de compléter dans une proportion importante les approvisionnements en produits naturels du pétrole par des carburants liquides de synthèse obtenus à partir du charbon et qu'en 2004, les combustibles liquides utilisés seront de ce dernier type. La consommation actuelle des produits pétroliers, en Nouvelle-Galles du Sud, atteint presque 2 millions de tonnes : chiffre multiplié par 7 (voir note *a*) pour 2004 et augmenté de 2 = 6 millions de tonnes de carburant synthétique.

[e] Multiplié par 3 pour tenir compte de l'accroissement de la population = 1 350 (arrondi à 2 000).

ANNEXE 2

Victoria
Consommation maximum raisonnablement prévisible de briquettes ou de « brown coal », de 1955 à 2004, pour toutes les utilisations autres que la production d'énergie

(En milliers de tonnes de « brown coal » ou de leur équivalent)

	Utilisation annuelle en 2004	Total pour les 50 années
Briquettes à usage industriel	16 000 [a]	340 000
Briquettes à usage domestique	1 000	Négligeable
Production de gaz et de coke	8 000 [b]	200 000
Chemins de fer	5 600 [c]	75 000
Combustibles liquides synthétiques	[d]	800 000
TOTAL arrondi à		1 500 000

[a] L'industrie utilise actuellement les quantités suivantes de combustibles :

	En milliers de tonnes	*En milliers de tonnes d'équivalent de lignite*
Lignite (qualité industrielle)	840	1 090
Houille	260	780
Briquettes	120	400
TOTAL		2 270

2 300 × 7 (coefficient d'expansion probable du produit national brut réel) = 16 100.

[b] Houille utilisée pour la production de gaz et de coke en 1952/53 = 700 000 tonnes;
En équivalent de lignite = 2 100 000 tonnes;
Multiplié par 4 en 2004 = 8 millions de tonnes.

[c] Dans l'hypothèse où les chemins de fer de l'État de Victoria utiliseraient du lignite pulvérisé à l'exclusion de tout autre combustible pour les turbines à gaz des locomotives, à partir de 1980.

A la cadence actuelle de l'exploitation, la consommation pourrait représenter l'équivalent de 600 000 tonnes de houille pour la production de vapeur.

Multiplié par 3 pour tenir compte de l'accroissement de la population.

Multiplié par 2 pour tenir compte de la décentralisation plus poussée.

Équivalent à 3 600 000 tonnes de houille pour la production de vapeur en 2004.

Équivalent à environ 5 600 000 tonnes de lignite comme combustible des turbines à gaz.

Équivalent à une quantité de lignite de l'ordre de 75 millions de tonnes comme combustible des turbines à gaz pour la période de 1980 à 2004.

[d] Voir note *d* de l'annexe 1.

ANNEXE 3

Production d'électricité en Nouvelle-Galles du Sud

Prévision du coût de production

(faite par la Direction de l'électricité de la Nouvelle-Galles du Sud)

A supposer que le niveau actuel des prix demeure constant, on estime que dans vingt ans le coût moyen global, calculé aux bornes collectrices, du kilowattheure produit dans les centrales thermiques chauffées au charbon s'établira approximativement comme suit :

Intérêt et provision pour amortissement	0,23 penny
Exploitation et entretien	0,06 penny
Combustible	0,31 penny
TOTAL	0,60 penny par kilowattheure (en monnaie australienne)

Les évaluations ci-dessus s'appuient sur les hypothèses suivantes :

Groupe chaudière-turbine (production moyenne) .	200 MW
Cycle de vaporisation . .	2 350 livres par pouce carré pour 1 000/1 050 °F (165 kg/cm² p. 540/565 °C)
Rendement thermique commercial moyen de la centrale	10 000 Btu par kWh (S.O.) (2 500 kcal)
Moyenne pondérée du coût du combustible à la station	63 shillings par tonne
Moyenne pondérée de la valeur calorifique brute (combustible effectivement consommé) . . .	10 800 Btu (2 700 kcal) par livre
Investissement en capital : 70 livres australiennes par kW (moyenne) plus intérêt de 8 livres par kW pendant la durée de la construction	78 livres australiennes par kW
Amortissement	25 années de vie et intérêt composé de 4 p. cent
Taux d'intérêt	4 pour cent
Énergie auxiliaire	7 pour cent
Coefficient moyen de puissance des centrales à vapeur	0,65

Le coefficient de puissance supposé des centrales à vapeur laisse aux centrales hydrauliques la fourniture du courant de pointe et permet au réseau de conserver une réserve suffisante. Il correspond à un coefficient de charge d'environ 0,55-0,60 pour le réseau.

On peut estimer que, dans vingt ans, des groupes chaudières-turbines d'un meilleur rendement et d'une puissance de 300 mégawatts seront installés et que la nouvelle centrale aura un coefficient de puissance beaucoup plus élevé que 0,65. Aussi, le coût du kilowattheure aux centrales de base ayant le rendement le plus élevé devrait être supérieur à celui de 0,60 penny cité plus haut.

ANNEXE 4

Australie méridionale

Besoins prévisibles d'énergie électrique entre 1955 et 2004

Année	Milliers de mégawattheures par an		
	Besoins totaux	Produits à l'aide de charbon extrait de la mine à ciel ouvert de Leigh Creek	A produire à l'aide d'autres sources
1954 . .	815	350	465
1955 . .	888	400	488
1956 . .	968	400	568
1957 . .	1 055	450	605
1958 . .	1 150	550	600
1959 . .	1 253	700	553
1960 . .	1 366	900	466
1961 . .	1 489	1 100	389
1962 . .	1 623	1 200	423
1963 . .	1 770	1 300	470
1964 . .	1 929	1 600	329
1969 . .	2 834	1 700	1 134
1974 . .	4 165	1 700	2 465
1979 . .	5 842	1 700	4 142
1984 . .	8 194	1 700	6 494
1989 . .	10 965	1 500	9 465
1994 . .	14 674	500	14 174
1999 . .	19 637	—	19 637
2004 . .	26 279	—	26 279
TOTAL . (1954non compris)	424 770	60 000	364 770

ANNEXE 5

Prévision à long terme de la production d'électricité en Nouvelle-Galles du Sud

(Direction de l'électricité de la Nouvelle-Galles du Sud)

DEMANDE MAXIMUM, CONSOMMATION D'ÉNERGIE DE CHARBON

Année	Demande maximum (en mégawatts)	Énergie consommée annuellement en millions de kilowattheures			Consommation annuelle de charbon, en millions de tonnes
		Hydraulique	Thermique (charbon)	Total	
1955	1 150	230	5 370	5 600	3,8
1956	1 250	260	5 840	6 100	3,9
1957	1 350	270	6 330	6 600	4,0
1958	1 500	740	6 560	7 300	4,1
1959	1 650	1 000	7 000	8 000	4,2
1960	1 800	1 000	7 700	8 700	4,5
1961	1 950	1 000	8 400	9 400	4,8
1962	2 100	1 700	8 400	10 100	4,7
1963	2 250	2 000	8 900	10 900	4,9
1964	2 400	2 600	9 300	11 900	5,1
1965	2 600	2 800	10 100	12 900	5,4
1970	3 600	3 600	14 200	17 800	7,0
1975	4 800	4 600	19 200	23 800	9,0
1980	6 200	4 700	26 800	31 500	12,0
1985	7 900	4 700	35 800	40 500	15,2
1990	9 800	4 700	45 300	50 000	18,2
1995	11 500	4 700	55 300	60 000	21,0
2000	13 400	4 700	65 300	70 000	23,0
2005	15 200	4 700	75 300	80 000	27,0
Total pour les 50 années		187 800	1 589 800	1 777 600	644

Évolution probable des besoins d'énergie en Belgique et rôle que pourra jouer l'énergie nucléaire

par R. Van Mele*

L'objet de la présente note est de faire le point des besoins actuels d'énergie en Belgique, de chercher à donner une idée générale de leur évolution probable au cours des quarante-cinq prochaines années et d'indiquer l'importance qui semble pouvoir être attribuée dans les années à venir, sur la base des idées actuelles, au charbon, aux produits pétroliers et à l'énergie nucléaire.

Il ne saurait cependant être question d'attribuer aux indications données dans ce qui suit une valeur de certitude à laquelle elles ne sauraient prétendre. Les chiffres que l'on citera et les résultats auxquels on aboutira ne pourront être regardés que comme des ordres de grandeur, marquant tout au plus des tendances très générales, valables uniquement comme moyennes à très long terme.

SITUATION ACTUELLE

Basée sur les valeurs publiées par le Ministère des Affaires économiques, la figure 1 donne, pour l'année 1952, une représentation schématique de la façon dont les consommations d'énergie ont été assurées par le charbon, le coke, le gaz, l'électricité et les combustibles liquides, et comment elles se sont réparties entre différents secteurs d'utilisation.

On observera que, dans le total des calories fournies, le charbon est intervenu à raison de 89 pour cent et les combustibles liquides pour 11 pour cent, le bois, le lignite et l'énergie hydraulique étant pratiquement négligeables.

52 pour cent du charbon ont été utilisés sous forme directe, 32 pour cent ont été transformés en coke et gaz, et 16 pour cent ont été consommés par les centrales électriques.

En admettant les rendements d'utilisation indiqués au tableau 1, on trouve que le rendement global d'utilisation a été de l'ordre de 43 pour cent. Si l'on tient compte des rendements de transformation du charbon en coke et gaz et du rendement de production de l'énergie électrique, on arrive à un rendement « énergie recueillie/énergie brute fournie » de l'ordre de 34 pour cent.

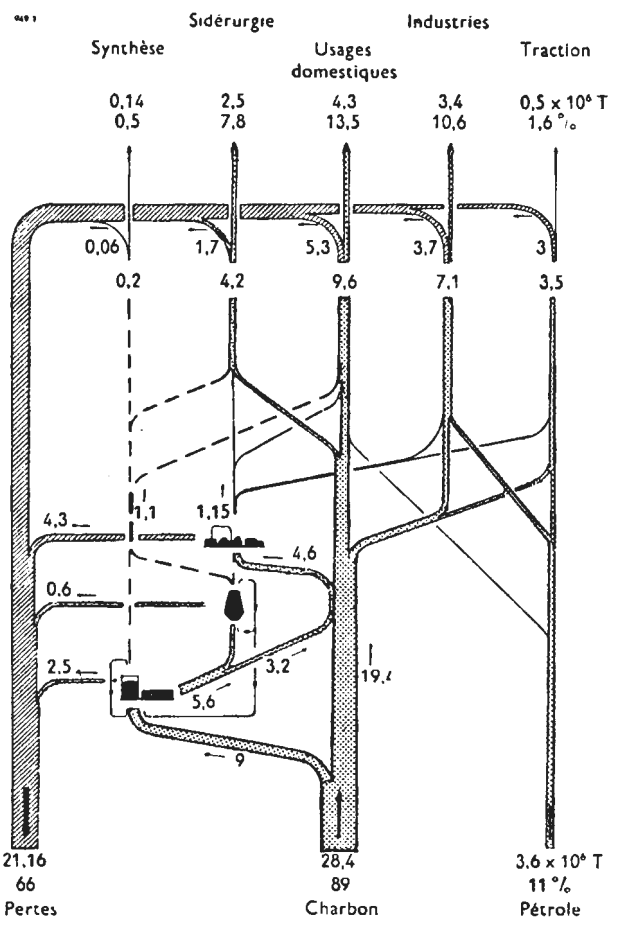


Figure 1. — Consommation d'énergie, répartie par catégorie de combustible, en 1952.

On ne peut manquer d'être frappé par l'importance des pertes qui accompagnent les utilisations et les transformations de l'énergie. Un tiers seulement des calories mises en jeu est récupéré, le reste est perdu.

Ce chiffre peut sembler faible; il est pourtant nettement supérieur à ce que l'on obtenait au début de ce siècle. Les rendements ne dépassaient guère à cette époque 10 à 15 pour cent. Il semble inutile d'insister longuement sur les efforts qu'il a fallu déployer pour aboutir aux résultats actuels.

* Ingénieur civil A. I. Br., directeur du Service des études de la Société pour la coordination de la production et du transport de l'énergie électrique (C.P.T.E.) Bruxelles.

Tableau 1

Rendements d'utilisation, 1952

Formes d'énergie	Usages domestiques (pour cent)	Transports (pour cent)	Industrie et sidérurgie (pour cent)	Rendement moyen (pour cent)
Charbons et agglomérés	40 à 45	5 à 6	45	39
Bois	40 à 45	5 à 6	45	42
Coke	40 à 45	5 à 6	45	44
Combustibles liquides	65	20 à 28	45	39
Gaz manufacturé et naturel	70 à 75	—	65	67
Électricité	45	80	80	75

Rendement global d'utilisation : 43 pour cent

PERSPECTIVES D'AVENIR

Les prévisions à très long terme des besoins d'énergie seront établies dans ce qui suit de deux manières distinctes : *a*) en premier lieu par la méthode « globale », qui cherchera à rattacher l'évolution des consommations d'énergie soit au revenu national, soit au niveau de la production industrielle; *b*) ensuite, par la méthode dite « des secteurs de consommation », qui s'efforcera de dégager la tendance d'activité à très long terme dans les secteurs industriels et domestiques, puis de prévoir le rapport entre cette activité et la demande d'énergie sous ses différentes formes : charbon, gaz, électricité, combustibles liquides.

Par sommation, négligeant le bois, le lignite et l'énergie hydraulique, on établira l'évolution probable des besoins d'énergie primaire, que l'on comparera aux estimations directes fournies par la méthode globale.

MÉTHODE GLOBALE

Nos besoins futurs d'énergie vont dépendre de l'expansion économique et démographique de notre pays.

Ces deux facteurs réagissent l'un sur l'autre. Dans certains pays sous-développés, on observe en effet qu'en améliorant les conditions de vie, le taux de mortalité diminue, ce qui déclenche aussitôt une augmentation rapide de la population, entraînant, dans certaines conditions favorables, un nouvel accroissement d'activité économique, qui réagit à son tour sur le taux de natalité, et ainsi de suite... Il s'amorce une réaction en chaîne qui semble ne jamais devoir s'arrêter; la population semble devoir augmenter indéfiniment en progression géométrique.

En réalité, la nature a mis des freins à de telles expansions. On observe que, dans les pays hautement industrialisés, à partir d'un certain niveau de vie, un nouvel accroissement de bien-être ne favorise plus avant tout les naissances, mais conduit au contraire à rechercher plus de confort et à multiplier les besoins. La dépendance réciproque des facteurs économiques et démographiques s'y atténue fortement : l'évolution économique n'y est plus directement réglée par l'accroissement de la population, mais par la productivité individuelle.

C'est la tendance que l'on observe en Belgique, et pour cette raison on a tablé sur un taux d'accroissement de la population plus faible que celui de l'activité économique.

1. La figure 2 montre comment s'est développée la population belge depuis 1920. La période de stabilité qui s'est manifestée de 1936 à 1944 a été suivie depuis la fin de la guerre d'une nouvelle période d'expansion.

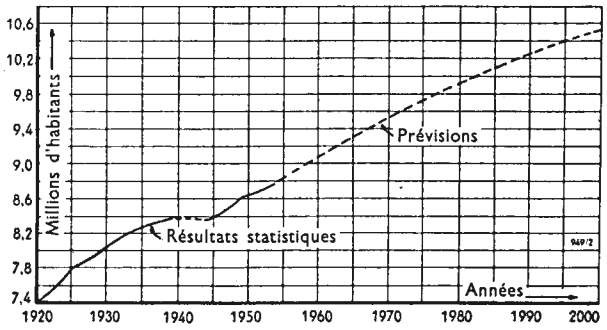


Figure 2. — Évolution de la population belge.

Il est impossible, sur la base de l'évolution d'après-guerre, de se former une idée quelque peu précise sur ce que sera notre population en 1980 ou en l'an 2000. Il semble toutefois peu probable qu'elle ira en décroissant. Pour autant que l'on puisse en juger à l'heure actuelle, il semble qu'elle aura plutôt tendance à augmenter. Il serait toutefois trop hasardeux d'extrapoler l'évolution des sept dernières années, et au lieu d'envisager pour 1980 les 11 millions d'habitants auxquels conduirait cette extrapolation, nous avons admis 9,9 millions seulement et 10,5 millions pour l'an 2000 (voir fig. 2), chiffres moyens résultant d'estimations faites par certaines compagnies d'assurances.

2. Le second facteur à considérer dans l'estimation des besoins d'énergie est la conjoncture économique.

Certains indices statistiques, tels le revenu national, la production industrielle ou la production des industries manufacturières, peuvent en donner une idée plus ou moins complète.

Le revenu national caractérise l'ensemble des revenus tirés de la production des biens et des services : industrie, agriculture, commerce, transport, etc., y compris ceux provenant de l'étranger. Il ne se rapporte donc à aucun élément particulier de la conjoncture.

L'indice de production industrielle et celui des industries manufacturières se rapportent au contraire à un ensemble d'activités bien déterminées et présentent de ce fait une signification beaucoup plus concrète pour le problème qui nous occupe ici.

Jusqu'à présent, ces deux indices ont évolué d'une façon sensiblement parallèle (fig. 3). Ce fait résulte de ce que, dans l'ensemble, les demandes d'énergie des différents secteurs de notre économie ont pu être satisfaites par notre production nationale de houille, de gaz et d'électricité, sans devoir faire appel à des importations massives.

Depuis 1920, la production industrielle a eu tendance à augmenter de 2,6 pour cent par an. De 1947 à 1952 cependant, l'augmentation a été de 3,6 pour cent par an, mais la conjoncture économique était à cette époque encore trop sous l'influence de l'immédiat après-guerre pour que l'on puisse adopter sans restrictions ce taux d'accroissement pour les prévisions.

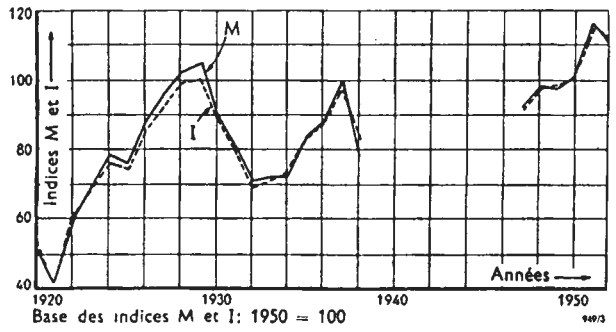


Figure 3. — Évolution de l'indice de la production manufacturière (M) et de l'indice de la production industrielle (I).

Aussi a-t-on basé celles-ci sur 2,6 pour cent qui conduit à un doublement en vingt-sept ans de l'activité industrielle. On admettra qu'il en ira de même de la conjoncture en général; un pays fortement industrialisé en équilibre économique voit en effet le mouvement général de ses affaires suivre la même progression que son activité industrielle.

Il sera donc admis que notre économie se développera dans les années à venir au rythme moyen enregistré par le passé. On ne tiendra pas compte de la possibilité de crises économiques, qu'il est impossible de prévoir.

3. Dans ce qui suit, une distinction sera faite entre l'énergie primaire — charbon, combustibles liquides, bois, lignite, énergie hydraulique, énergie nucléaire — et l'énergie utile, c'est-à-dire ce qui reste de l'énergie primaire après déduction des pertes de transformation et d'utilisation.

La consommation d'énergie utile est liée directement à l'évolution des besoins, mais l'énergie primaire indique ce qu'il faut extraire de charbon et importer de combustible. C'est donc elle qu'il importe de connaître en fin de compte.

Or, depuis la fin du siècle dernier, les besoins d'énergie primaire sont restés relativement stationnaires, alors que les besoins d'énergie utile ont fortement augmenté.

Ainsi par exemple en Belgique, la consommation d'énergie primaire a subi depuis 1900 certaines variations, mais n'a pas, dans l'ensemble, augmenté aussi fortement que l'activité économique.

Aux États-Unis d'Amérique, la consommation d'énergie utile par habitant a presque triplé de 1917 à 1947, mais l'énergie primaire n'a augmenté que de 7 pour cent. En Grande-Bretagne, l'énergie primaire utilisée par habitant a quelque peu diminué depuis 1887 tandis que la consommation d'énergie utile a triplé.

Tableau 2

Consommation totale d'énergie

	1950	1955	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000
Énergie utile globale (10^{12} kcal)	71,5	79	87	96	105	116	127	140	154	169	186
Rendement de transformation et d'utilisation (pour cent)	34	34,4	34,8	35,2	35,6	36	36,4	36,8	37,2	37,6	38
Énergie primaire globale (10^{12} kcal) .	210	230	250	273	295	322	350	380	415	450	490

La stabilité relative des consommations d'énergie primaire au regard de l'augmentation rapide des besoins d'énergie utile est un des faits les plus caractéristiques de l'époque écoulée. Elle résulte des progrès techniques qui ont permis d'améliorer considérablement les rendements de transformation et d'utilisation dans tous les domaines : traction ferroviaire, sidérurgie, production de gaz et de coke, production d'énergie électrique, etc.

Le rendement est susceptible d'augmenter encore. En beaucoup de domaines — centrales électriques, chauffage, etc. — des progrès peuvent être réalisés. Mais en beaucoup d'autres, les limites théoriques ont été atteintes; dans certains, on est fort près de ces limites et beaucoup plus proche encore des limites pratiques qui sont soumises à toutes les contingences d'une exploitation industrielle.

Aussi ne faudra-t-il plus espérer des progrès du même ordre que par le passé. Pour 1980 on a été conduit à envisager un rendement global moyen de l'ordre de 37 pour cent, et pour l'an 2000 un rendement de l'ordre de 38 à 39 pour cent.

4. L'examen des tendances au cours des trente dernières années a montré qu'en moyenne, à tout accroissement de 1 pour cent de l'activité économique, correspondait une augmentation des besoins globaux d'énergie utile de 0,6 à 0,7 pour cent.

Si l'on adopte pour l'activité économique un taux d'accroissement de 2,6 pour cent par an et un coefficient de correspondance de 0,7, l'augmentation des besoins d'énergie utile se situerait à 1,8 pour cent l'an.

En tenant compte de l'amélioration des rendements de transformation et d'utilisation définie ci-dessus, on arrive pour les besoins d'énergie primaire à un taux d'accroissement annuel de 1,7 pour cent.

Par habitant, en tenant compte de l'augmentation de la population, les besoins d'énergie utile augmenteraient en moyenne, de 1950 à l'an 2000, de 1,6 pour cent par an et les besoins d'énergie primaire, de 1,5 pour cent par an.

C'est sur de telles bases que les estimations ont été établies et que l'on a obtenu les valeurs du tableau 2.

Brièvement rappelées, ces hypothèses sont :

	1955	*1980*	*2000*
Population (en millions)	8,8	9,9	10,5
Rendement global d'utilisation et de transformation (en pour cent)	34	37	38 à 39
Augmentation de l'activité économique (en pour cent par an) . .	—	2,6	—
		Globale	*Par habitant*
Augmentation des besoins d'énergie utile (en pour cent par an)		1,8	1,6
Augmentation des besoins d'énergie primaire (en pour cent par an)		1,7	1,5

MÉTHODE D'ESTIMATION « PAR SECTEURS »

Énergie électrique

La figure 4 montre comment a évolué la consommation d'électricité en Belgique depuis 1920. La crise économique des années 1930-1933 et la dernière guerre ont été marquées par deux périodes d'assez forte régression, mais elles n'ont pas eu d'influence durable.

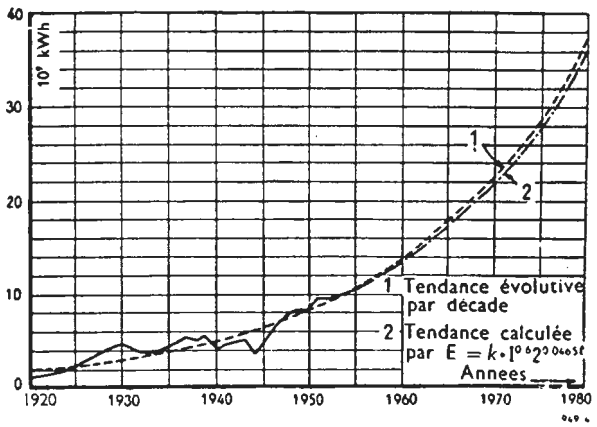


Figure 4. — Évolution de la consommation annuelle d'énergie électrique.

La tendance évolutive par décade, représentée par la courbe 1, correspond à un accroissement annuel de 5,3 pour cent, soit un doublement des consommations en quinze ans. Mais tous les secteurs n'ont pas marqué la même évolution : dans certaines entreprises de distribution publique, le doublement s'est effectué en douze ans, il n'a eu lieu qu'en vingt ans dans certains secteurs industriels.

Si l'on admet un accroissement moyen de 5,3 pour cent par an, on est conduit à prévoir pour 1980 une consommation de l'ordre de 38×10^9 kWh, soit près de quatre fois la consommation actuelle. Il a cependant paru trop aléatoire, pour une période couvrant quarante-cinq ans, de se baser uniquement sur une simple extrapolation. Aussi a-t-on cherché à établir un recoupement, en essayant de relier les consommations d'énergie électrique à l'évolution des facteurs économiques généraux.

Les statistiques établies depuis 1930 laissent apparaître un parallélisme assez étroit entre la production industrielle et la consommation totale d'électricité du pays.

L'évolution de l'indice de production industrielle I et des consommations totales d'électricité E, au cours des années 1930-1938 et 1947-1953, a permis d'établir la relation suivante :

$$E = K\ I^{0,6} \times 2^{0,046\,5\,t}$$

où t est le temps et K une constante d'adaptation.

Formule classique, qui montre que la consommation d'électricité subit, en dehors de l'action directe de la conjoncture économique, l'influence

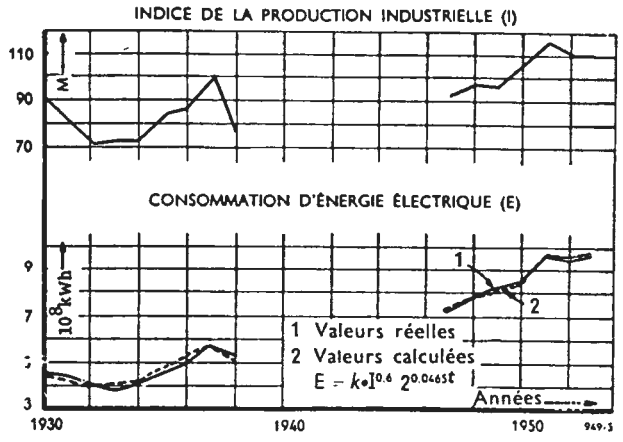


Figure 5.

d'un élément de tendance (fonction exponentielle du temps) qui rend compte de la pénétration de l'électricité dans divers secteurs où elle vient se substituer à d'autres formes d'énergie.

La figure 5 montre que cette formule rend compte d'une façon satisfaisante de l'évolution réelle des consommations.

En se basant sur une augmentation de 2,6 pour cent par an pour l'activité économique, on obtient pour les vingt-cinq années à venir l'évolution des consommations d'électricité représentée par la courbe 2 de la figure 4. On observera qu'elle est voisine de la courbe 1 déterminée par simple extrapolation et que le recoupement des deux séries de valeurs s'effectue d'une manière satisfaisante.

On en concluera que, sur la base de l'évolution économique admise, on peut s'attendre à une augmentation moyenne des consommations d'énergie électrique de l'ordre de 5,3 pour cent au cours des vingt-cinq prochaines années.

La relation entre E, I et t indiquée ci-dessus ne laissant apparaître aucun facteur de saturation, si l'on continuait d'admettre au-delà de 1980 ce même taux d'augmentation annuel, la consommation d'électricité par habitant serait en l'an 2000 dix fois supérieure à celle de 1950. L'accroissement serait plus important qu'aux États-Unis où certaines estimations récentes conduisent à prévoir pour cette époque une consommation par habitant sept fois supérieure à celle de 1950.

Sans doute peut-on estimer qu'il y a pour notre pays dans le domaine de l'électricité un retard à rattraper. Cependant les possibilités d'expansion économique de la Belgique sur les marchés intérieur et extérieur sont très différentes de celles des États-Unis. La Belgique est en effet un pays d'économie marginale, son activité se développe très rapidement en cas de haute conjoncture, mais elle subit très profondément le contre-coup des fluctuations de celle-ci.

Notons également que notre pays, pratiquement dépourvu de ressources hydrauliques, n'a pu développer certaines industries grosses consommatrices d'électricité, comme par exemple la fabrication d'aluminium et qu'il reste là, pour notre industrie électrique, un sérieux handicap.

Enfin, un des facteurs importants d'augmentation des consommations d'électricité prévu aux États-Unis est l'application de la « pompe à chaleur » au conditionnement d'air et au chauffage. Le climat chaud et humide en été, de certaines régions, favorise le développement du conditionnement d'air.

En Belgique, les conditions climatiques sont très différentes et il semble peu probable que l'on doive s'attendre à un grand développement des applications de la « pompe à chaleur ».

Il semble donc que les estimations des consommations d'électricité au-delà de 1980 devraient être faites avec prudence.

C'est la raison pour laquelle, bien qu'à l'heure actuelle, répétons-le, aucun indice ne permette de prévoir une atténuation du rythme d'accroissement, il a été admis par mesure de prudence à partir de 1980, un doublement des consommations en seize ou dix-sept ans, au lieu de quinze ans. Ceci conduirait en l'an 2000 à une consommation d'électricité environ sept fois supérieure par habitant à celle de 1950.

Consommation de charbon pour la production d'électricité

En 1953, la consommation spécifique de charbon était de l'ordre de 3 800 kcal/kWh utile dans l'ensemble des centrales électriques belges. Les progrès techniques en cours conduisent à penser qu'en 1980 la consommation en régime industriel pourrait être voisine de 2 400 kcal/kWh utile, et en l'an 2000 voisine de 2 300 kcal pour la partie alimentée au charbon (fig. 6).

En 1950-1953 le charbon intervenait approximativement pour 85 pour cent dans la production d'électricité et le gaz de haut fourneau pratiquement pour le complément, la part du fuel-oil et de l'énergie hydraulique étant minime.

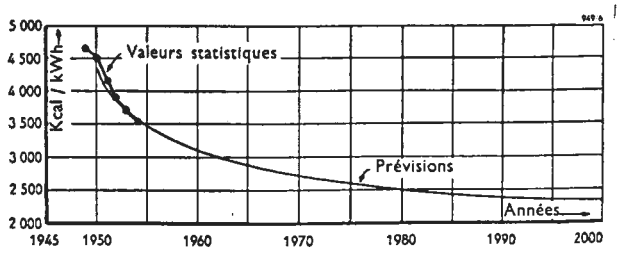


Figure 6. — Évolution des consommations spécifiques de l'ensemble des centrales électriques.

Les ressources hydrauliques de la Belgique, très faibles par rapport aux besoins d'énergie, seront négligées dans ce qui suit. On admettra que la proportion de combustibles liquides dans la production d'électricité restera très faible. Des résidus de distillation vont être utilisés sous peu dans une centrale du nord du pays, mais si la capacité de raffinage des installations pétrolières devait augmenter, les quantités supplémentaires de résidus seraient probablement utilisées en pétrochimie plutôt que réservées aux centrales électriques.

Par ailleurs, on n'envisage pas d'utiliser à grande échelle des turbines à gaz alimentées aux combustibles liquides.

La part revenant au gaz de haut fourneau est liée à l'activité de la sidérurgie dont le développement, au cours des quarante-cinq prochaines années, dépendra vraisemblablement, dans une large mesure, des dispositions que prendra la CECA.

On admettra pour la Belgique un doublement de la production sidérurgique en cinquante ans.

Les quantités de coke nécessaires à la fabrication d'une tonne d'acier n'ont cessé de baisser depuis 1900. Bien que des progrès restent possibles, certains auteurs estiment cependant que l'on approche des limites théoriques. Aussi admettra-t-on que dans les quarante-cinq prochaines années, les consommations à la tonne vont se stabiliser progressivement. On peut donc estimer en première approximation que les quantités de coke utilisées augmenteront sensiblement dans la même proportion que la production d'acier (la proportion de mitraille dans les charges étant supposée la même qu'à l'heure actuelle) et que la production de gaz de haut fourneau subira sensiblement le même accroissement. On peut admettre qu'il en sera de même de la part de gaz réservée à la production d'énergie électrique.

En l'an 2000, si aucune centrale nucléaire n'était en service, le charbon interviendrait dans la production d'électricité à raison de 98 pour cent, contre 85 pour cent à l'heure actuelle.

Le pouvoir calorifique des mélanges utilisés dans nos centrales électriques a baissé notablement ces dernières années. En 1953, il était voisin de 5 300 kcal/kg, alors que les charbons classés atteignent 7 000 à 7 300 kcal/kg, ce qui indique à quel point l'industrie électrique s'est efforcée d'utiliser les bas produits de la mine.

Si la recherche d'un prix de revient minimum incite les exploitants de centrales à augmenter constamment leurs consommations de charbon de basse qualité, les quantités disponibles sont toutefois limitées en Belgique à quelque 20 à 25 pour cent de l'extraction annuelle, soit environ 7 millions de tonnes. Il faudra donc, tôt ou tard, en revenir à des proportions plus importantes de charbon de bonne qualité et à un relèvement du pouvoir calorifique moyen. La courbe de la figure 7 indique l'évolution des pouvoirs calorifiques envisagée au cours des quarante-cinq prochaines années.

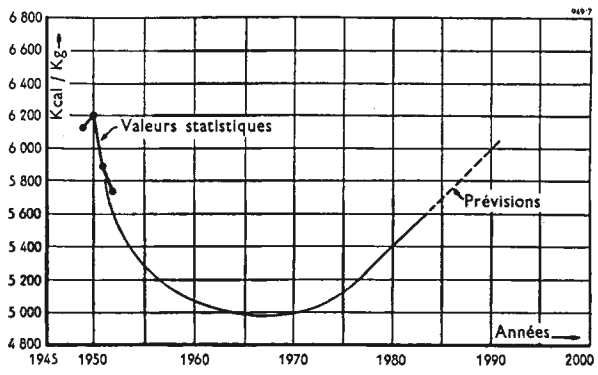


Figure 7. — Évolution du pouvoir calorifique moyen (P.C.S.) des mélanges utilisés dans les centrales électriques.

Partant des données définies ci-dessus concernant l'évolution des rendements de production et des pouvoirs calorifiques des mélanges de charbon, on aboutit aux chiffres du tableau 3, qui indique les tonnages de charbon nécessaires à la production d'électricité, dans l'hypothèse où aucune centrale nucléaire ne serait en service d'ici l'an 2000.

Cependant, dans cette hypothèse, la consommation de charbon ne serait, grâce à l'amélioration du rendement des centrales, que cinq fois supérieure à celle de 1950 pour une consommation d'électricité huit fois supérieure, et l'industrie électrique consommerait à elle seule, en l'an 2000, à peu près tout le tonnage de charbon extrait à l'heure actuelle dans l'ensemble de nos charbonnages.

C'est dire que d'ici l'an 2000 il faudra faire appel, pour la production d'électricité, à de nouvelles sources d'énergie.

Consommation de charbon pour les besoins autres que la production d'électricité

Le charbon a toujours été notre principale source d'énergie. Il l'est toujours, mais les combustibles liquides lui font une concurrence de plus en plus forte, notamment en traction ferroviaire, pour certains usages domestiques et dans certaines industries manufacturières.

Le développement du marché du charbon reste cependant encore intimement lié au développement économique général. Deux facteurs agissent principalement sur sa demande : l'évolution technique et le développement de la production industrielle.

Évolution technique

Depuis le début du siècle, on a observé dans tous les domaines une amélioration considérable des rendements d'utilisation du charbon. Ce sont les mouvements de hausse des prix de ce combustible qui semblent avoir été les stimulants les plus vifs en vue de l'épargner. Cette hausse des prix doit être imputée aux coûts croissants qui affectent son

Tableau 3

Consommation de charbon en centrales électriques

	1950	1955	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000
Consommation d'énergie électrique (10^9 kWh)	9	11	14	18	23	28	35	43	52	62	73
Consommation spécifique (kcal/kWh)	4 300	3 500	3 100	2 900	2 700	2 600	2 500	2 450	2 400	2 350	2 300
Énergie demandée à l'entrée des centrales (10^{12} kcal) . .	39	39	43	52	62	73	88	105	125	146	168
Part du charbon dans la production d'électricité (pour cent) . . .	85	87	89	91	92	93	94	95	96	97	98
Énergie à fournir par le charbon (10^{12} kcal)	33	34	38	47	57	68	83	100	120	142	165
Tonnage de charbon (P.C.S., voir fig. 8)	5,3	6,4	7,5	9,4	11,4	13,3	15,4	17,5	20,4	23,3	26,6

extraction. Elle continuera sans doute dans les années à venir, mais il est certain qu'il n'est désormais plus possible d'épargner le charbon dans la mesure où on l'a fait depuis le début du siècle. On se rappellera les remarques faites plus haut à ce sujet. Bien que les progrès se poursuivent, notamment dans les centrales électriques, on entre dans la dernière phase où les améliorations d'ensemble de l'utilisation du charbon vont se stabiliser progressivement.

Cependant, la concurrence d'autres sources va se faire sentir de plus en plus.

Production industrielle

Sur la base des chiffres des années 1925 à 1939 on a cherché à établir une relation entre la consommation de charbon, la production industrielle I et le temps t.

On a trouvé l'expression suivante :

$$C = I^{0,8} \times 0{,}99^t \times k$$

k étant une constante d'adaptation.

Cette formule indique dans quelle mesure la consommation globale de charbon du pays dépend de son activité industrielle. Par le terme $0{,}99^t$ elle montre qu'au cours des quinze années précédant la guerre, il s'était produit une diminution de consommation de charbon de l'ordre de 1 pour cent par an, résultant des progrès techniques qui avaient permis d'améliorer notablement les rendements.

En examinant ce qui s'est passé depuis 1948, on est arrivé à conclure que l'expression précédente restait applicable. La consommation de charbon garde donc sensiblement la même élasticité par rapport à l'activité industrielle. De même la diminution annuelle des consommations est restée sensiblement la même, mais tandis qu'avant guerre elle était attribuable principalement à l'augmentation des rendements, elle est due maintenant en majeure partie aux substitutions fortement accentuées de produits pétroliers au charbon.

On admettra au cours des vingt-cinq prochaines années, pour le terme dépendant du temps, un coefficient de 0,985, soit une diminution annuelle de 1,5 pour cent, envisageant ainsi dans une certaine mesure une action cumulative des facteurs rendement (0,3 à 0,4 pour cent) et substitution (1,1 à 1,2 pour cent).

En 1950, 28 millions de tonnes de charbon ont été utilisées pour la production de coke, de gaz, d'électricité, les besoins domestiques, les transports et les industries diverses.

Si l'on admet pour I l'augmentation de 2,6 pour cent par an dont il a été fréquemment question ci-dessus, on obtient les chiffres indiqués au tableau 4, en calories et en tonnes.

Ces valeurs donnent une première idée de l'évolution probable des consommations de charbon pour les usages autres que la production d'énergie électrique. Mais dans le but d'obtenir un recoupement de ces chiffres, on a cherché à extrapoler les tendances enregistrées par le passé dans trois grands secteurs : cokeries, industries du gaz et utilisations directes. Dans ces dernières, on a distingué principalement les usages domestiques, les industries diverses et les transports.

Dans son second rapport sur les perspectives du développement à long terme du marché du charbon, la CECA indique qu'elle se propose de développer la production d'acier de 40 pour cent en dix ans. Si elle se maintenait au-delà de cette décade, une telle augmentation conduirait à un doublement de la production en vingt ans. Ce programme peut paraître assez ambitieux, surtout si l'on songe que la

Tableau 4

Consommations de charbon exprimées en 10^{12} kcal et en tonnes

	1950	1955	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000
Indice de production manufacturière (*M*).	100	114	129	147	167	190	216	245	278	314	358
Consommation totale de charbon (10^{12} kcal)	190	201	211	222	234	247	260	274	288	302	319
Consommation de charbon pour centrales (10^{12} kcal) .	33	34	38	47	57	68	83	100	120	142	165
Consommation de charbon pour autres usages (10^{12} kcal)	157	167	173	175	177	179	177	174	168	160	154
Consommation de charbon pour autres usages (10^6 tonnes)[a]	22,5	23,9	24,8	25	25,3	25,6	25,3	24,9	24,1	23	22

[a] Sur la base d'un charbon à 7 000 kcal/kg.

production de la sidérurgie belge, de 1920 à 1953, a marqué dans l'ensemble une tendance à doubler en trente à trente-cinq ans. Dans ce qui suit, on envisagera un doublement en quarante-cinq à cinquante ans.

En admettant que la mise au mille (quantité de coke nécessaire pour élaborer une tonne d'acier) et le rendement des fours à coke ne subiront plus de modifications notables, on peut estimer que les quantités de charbon à fournir aux cokeries pour l'alimentation de la sidérurgie suivront sensiblement la même progression que la production d'acier. On admettra un doublement des consommations dans ce secteur, en cinquante ans.

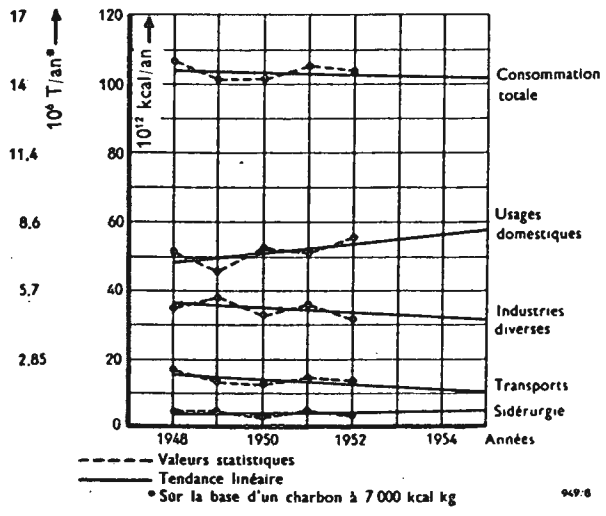


Figure 8. — Évolution de la consommation de charbon pour utilisations directes.

Pour le gaz manufacturé réservé aux usages domestiques et à l'industrie, d'après les données statistiques, on pourrait s'attendre à un doublement de la consommation en vingt-cinq ans.

Enfin, en ce qui concerne l'ensemble des utilisations directes du charbon, la figure 8 indique quelles ont été, ces cinq dernières années, les tendances particulières dans ce secteur. La consommation de charbon proprement dit en sidérurgie est restée pratiquement stationnaire. En traction, elle a diminué fortement par suite de l'électrification et de l'utilisation de moteurs diesel. Elle deviendra probablement très faible dans quelques années. Dans les industries, elle a également diminué d'une façon marquée, tandis que pour les usages domestiques, malgré la concurrence des combustibles liquides, elle paraît en nette augmentation. Ce fait pourrait s'expliquer par un relèvement du standing de vie qui a favorisé le développement du chauffage central.

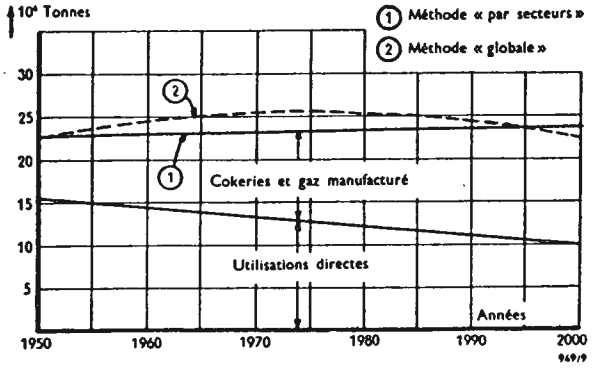


Figure 9. — Évolution de la consommation de charbon.

La courbe globale marque cependant une faible diminution, de l'ordre de 5 pour cent en vingt-cinq ans. Dans ce qui suit, pour tenir compte d'un ralentissement possible dans le secteur domestique par substitution de combustibles liquides au charbon, on admettra une diminution de 15 pour cent en vingt-cinq ans.

L'ensemble des tendances dans les secteurs que l'on vient d'examiner conduisent à une évolution représentée schématiquement à la figure 9. La courbe obtenue à partir de l'expansion industrielle a été reportée également sur cette figure. On notera que, dans l'ensemble, le recoupement des valeurs s'établit d'une manière satisfaisante.

Consommation de combustibles liquides

L'utilisation des produits pétroliers suit dans notre pays une progression exponentielle du même type que celle de l'énergie électrique. La consommation de combustibles liquides a augmenté en Belgique dix fois entre 1920 et 1950 et vingt fois entre 1920 et 1952. Ces cinq dernières années, elle a pratiquement doublé.

L'augmentation très rapide depuis la fin de la guerre a été provoquée principalement par l'écart grandissant entre les prix du pétrole et du charbon. Par rapport à la moyenne des prix de gros, le prix du pétrole est resté relativement bas, tandis que celui du charbon n'est actuellement que de 50 à 70 pour cent de ce qu'il était en 1936-1938. Pour le fuel-oil, ce rapport est de 30 à 50 pour cent.

En Belgique, au cours des trente-cinq dernières années, l'accroissement annuel des consommations de combustibles liquides a été voisin de 9 pour cent et ces cinq dernières années il a même atteint 15 pour cent.

Ces chiffres sont toutefois susceptibles d'assez fortes variations si le rapport des prix avec le charbon devait se modifier. Notons à ce sujet qu'une comparaison faite aux États-Unis d'Amérique entre cinq industries grosses consommatrices de combustibles a fait ressortir qu'il n'existe aucune tendance systématique à recourir à un type de combustible plutôt qu'à un autre, mais que la raison principale des différences qui séparent ces industries, quant à la proportion de combustible liquide utilisé, tient aux variations des prix relatifs.

Des fluctuations des prix relatifs étant possibles au cours des vingt-cinq prochaines années, on admettra une augmentation annuelle de 6 pour cent (voir tableau 5).

Pour les années au-delà de 1980, il nous semble assez difficile d'établir des estimations. En effet, l'accroissement considérable des utilisations de produits pétroliers risque de conduire vers la fin du siècle à une crise grave pour ces combustibles : les ressources en pétrole du monde semblent n'être que le cinquième environ de celles des combustibles solides, alors que la consommation mondiale actuelle

Tableau 5

Consommation de combustibles liquides (10^{12} kcal)

1950	20	1970	64
1955	26,8	1975	86
1960	35,8	1980	115
1965	48		

de cette source d'énergie approche déjà de la moitié de celle représentée par le charbon.

Dans certaines estimations, on voit d'ailleurs à partir de 1980 la consommation de combustibles liquides naturels diminuer considérablement et être remplacée par des combustibles liquides obtenus à partir du charbon.

Besoins totaux d'énergie primaire

La sommation des valeurs relatives aux consommations de charbon dans les différents secteurs et des combustibles liquides, reprises aux tableaux 3 à 5, conduit à la courbe 1 de la figure 10. Elle indique de la sorte les besoins totaux d'énergie primaire déduits de l'application de la méthode d'évolution dite « par secteur ».

Si l'on reproduit en regard de celle-ci les valeurs obtenues par la méthode globale, on constate, aussi loin que l'évolution des besoins de combustibles liquides a pu être évaluée, que la concordance entre les deux séries d'estimations est satisfaisante.

Si l'on complète cette figure en montrant comment s'est effectuée l'évolution des besoins d'énergie primaire depuis 1900, deux points saillants peuvent être mis en évidence :

a) Tout d'abord, en ce qui concerne les besoins globaux d'énergie, on notera la différence fondamentale entre le passé et le futur. En effet, depuis le début du siècle, la consommation d'énergie primaire est, malgré certaines fluctuations, restée relativement stationnaire bien que les besoins aient augmenté considérablement. La raison en a été indiquée ci-dessus : amélioration continue des rendements de production et d'utilisation. Pour les années futures, comme il ne faut plus s'attendre à réaliser encore des progrès du même ordre, les besoins d'énergie primaire vont nécessairement devoir s'aligner sur l'évolution des besoins d'énergie utile, c'est-à-dire augmenter au même rythme que le développement économique général. D'où la forme franchement ascendante de la courbe des besoins d'énergie primaire.

b) En second lieu, on observera que les produits pétroliers interviennent à l'heure actuelle à raison de 11 pour cent dans nos besoins globaux d'énergie, mais qu'il est prévu pour ceux-ci une intervention rapidement croissante, conduisant à une proportion de 20 pour cent en 1965 et de 29 pour cent en 1980.

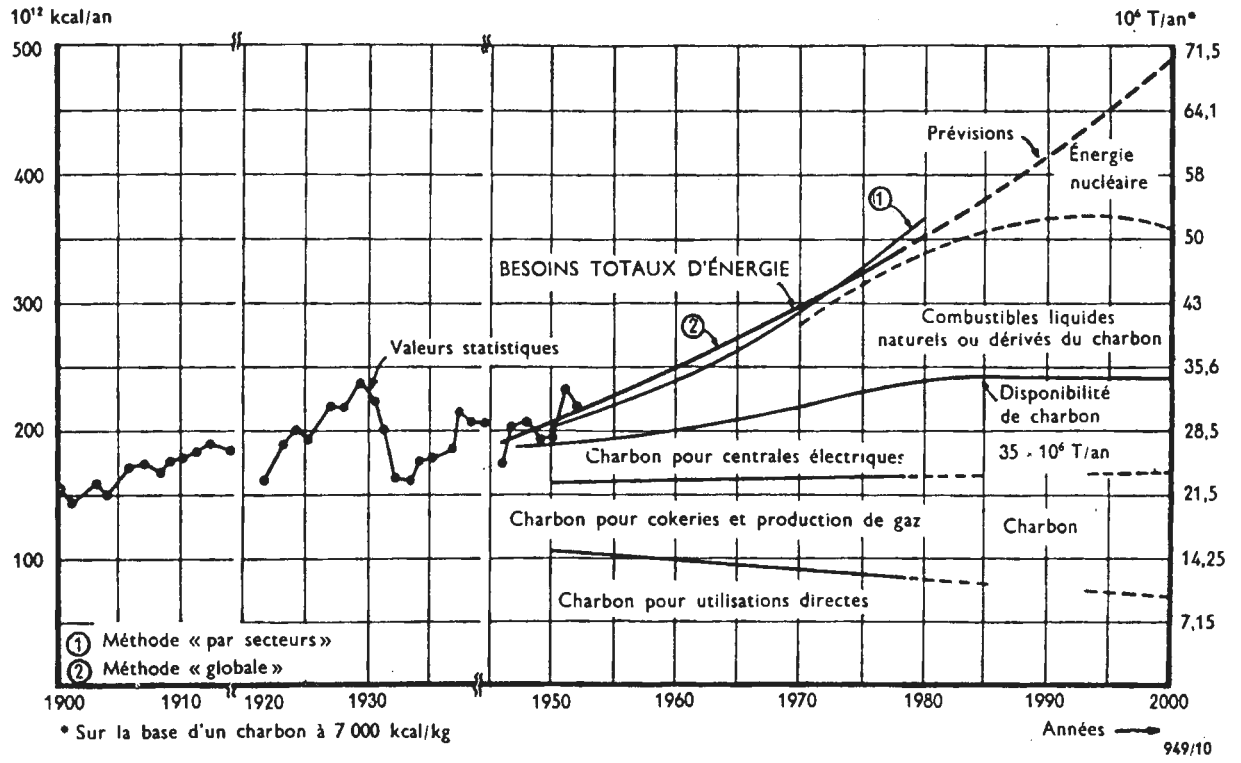


Figure 10. — Évolution des besoins totaux d'énergie et de l'utilisation des différentes sources.

A cette dernière date, leur consommation représenterait l'équivalent de 16,5 millions de tonnes de charbon à 7 000 kcal/kg, c'est-à-dire à peu près la moitié de l'extraction actuelle de houille en Belgique.

Pareille augmentation, qui peut sembler assez importante, est cependant basée sur un taux d'accroissement de 6 pour cent, alors que la moyenne des trente-cinq dernières années a été de 9 pour cent.

Possibilités d'assurer ces besoins

Les quantités de charbon extraites annuellement de nos mines ont depuis 1920 subi certaines fluctuations, mais n'ont jamais dépassé sensiblement 30 millions de tonnes par an. Si l'on examine les possibilités d'avenir, on notera certaines tendances contradictoires. Pour pouvoir abaisser le prix de notre charbon, qui est un des plus chers d'Europe, notre industrie charbonnière sera peut-être conduite, au cours des prochaines années, à fermer certains puits devenus peu rentables. Il ne devrait cependant en résulter aucune réduction systématique de la production houillère, car nos réserves, de l'ordre de 3 000 à 4 000 millions de tonnes, sont encore fort importantes. Les moyens d'extraction actuels offriraient d'ailleurs une certaine marge capable d'assurer un accroissement de production de quelque 10 à 15 pour cent, principalement par la mise en exploitation des réserves disponibles en Campine.

Il existe d'autre part la possibilité de récupérer par gazéification intégrale certains bas produits actuellement rejetés au terril.

La production brute de nos charbonnages dépasse d'environ 30 pour cent, soit de quelque 9 millions de tonnes, leur production nette. Ce surplus comprend environ 6 millions de tonnes de schistes à 20 pour cent de charbon, desquels par gazéification intégrale il pourrait être extrait par tonne environ un million de calories gaz. Ces 6 millions de tonnes de schistes seraient donc équivalents à un peu moins de 1 million de tonnes de houille à 7 000 kcal. Mais cette récupération n'est encore qu'une possibilité d'avenir.

On arriverait ainsi, par augmentation d'extraction et par récupération quasi intégrale de bas produits, à un maximum voisin de 34 à 36 millions de tonnes, tandis que la production nette actuelle ne dépasse guère 30 millions de tonnes par an.

La réalisation des objectifs de la CECA devrait donner à notre pays la possibilité d'importer d'appréciables quantités de charbon à des prix intéressants. Notons cependant que l'appauvrissement graduel des gisements de houille devient un phénomène assez général en Europe occidentale, et si la Belgique peut espérer obtenir de ses voisins des fournitures de charbon, celles-ci ne pourront vraisemblablement pas dépasser certaines limites. Il se peut d'ailleurs que l'on soit amené à demander des qualités de charbon bien précises, que nos mines ne produisent plus mais que notre industrie réclame, et que cette sélection constitue une difficulté de plus pour nos importations.

Si l'on se base sur une limite supérieure de 35 millions de tonnes, il est probable que notre pays utilisera entièrement cette quantité de combustible, par an, vers 1980. C'est à partir de cette époque également qu'il faudra peut-être commencer à se tourner vers la production de combustibles liquides à partir du charbon.

Si telle est bien la nécessité, notre pays aura peut-être quelque difficulté à s'adapter à cette nouvelle exigence puisqu'il consommera déjà sous forme directe la totalité des disponibilités annuelles de houille.

Sans doute, l'évolution probable des besoins d'énergie considérée dans la présente étude est-elle basée sur des moyennes statistiques susceptibles de certains écarts. Il n'y a certes pas pour la demande future une ligne d'une absolue certitude, mais un éventail de lignes d'avenir présentant une certaine dispersion.

Il ne faut donc pas vouloir tirer de ce qui précède des conclusions formelles. Nous l'avons expressément dit dans le préambule. Néanmoins, il semble probable que dans vingt ans les besoins à couvrir par les combustibles autres que le charbon deviendront fort importants.

Si l'on trace sur la figure 10 une droite représentant la limite des disponibilités de charbon, on obtient un recoupement avec la courbe des besoins de charbon vers l'année 1980, et la partie comprise entre cette dernière et celle qui représente les besoins globaux d'énergie indique ce qu'il y aurait lieu d'assurer par les combustibles liquides et nucléaires.

Dans le haut de cette zone a été isolée celle que l'on estime à l'heure actuelle susceptible d'être assurée par ces derniers. Elle correspond au déficit de charbon pour la production d'énergie électrique, plus une certaine quantité réservée à d'autres usages. Cette valeur n'est toutefois donnée qu'à titre indicatif; il y aurait évidemment, dans la situation particulière à la Belgique, grand intérêt à développer le plus rapidement possible l'utilisation de cette nouvelle source d'énergie.

En guise de résumé, nous indiquerons ci-dessous les principaux éléments de base de l'étude. Il a été admis :

a) Qu'il ne se produira aucune crise économique aiguë ni modification brutale de notre structure économique;

b) Que l'activité augmentera de 2,6 pour cent par an;

c) Que les rendements globaux de transformation et d'utilisation dans l'ensemble du pays, actuellement de l'ordre de 34 pour cent, seront voisins de 37 pour cent en 1980 et de l'ordre de 38 à 39 pour cent en l'an 2000;

d) Que l'augmentation globale des besoins d'énergie primaire sera de 1,7 pour cent par an, soit 1,5 pour cent par an et par habitant;

e) Que la consommation d'électricité doublera en quinze ans jusqu'en 1980, puis en seize ou dix-sept ans;

f) Que la consommation de coke en sidérurgie doublera en cinquante ans : accroissement sensiblement équivalent à l'augmentation présumée de la production sidérurgique;

g) Que la consommation de gaz pour les besoins domestiques et l'industrie autre que la sidérurgie doublera en vingt-cinq ans;

h) Que la consommation spécifique de charbon pour les usages autres que la production d'énergie électrique diminuera, par suite de l'amélioration des rendements et de la substitution de produits pétroliers au charbon, de 1,5 pour cent par an;

i) Que la consommation spécifique de charbon en centrales électriques, voisine actuellement de 3 800 kcal/kWh, s'abaissera jusqu'à 2 400 kcal en 1980 et à 2 300 kcal en l'an 2000;

j) Que la consommation de combustibles liquides augmentera en moyenne jusqu'en 1980 de 6 pour cent par an;

k) Que l'extraction maximum de charbon se situera au voisinage de 35 millions de tonnes par an.

On notera dès lors qu'il serait fort utile pour notre pays de pouvoir disposer de l'énergie nucléaire, sur le plan industriel, d'ici quinze à vingt ans.

Comme il a été dit dans le préambule, cette nouvelle source d'énergie ne peut manquer de jouer un rôle de premier plan dans notre pays, d'autant plus important qu'elle nous assurera une large autonomie d'approvisionnement en énergie et qu'elle jouera un rôle important de stabilisateur des prix de l'énergie.

Il est prévu qu'elle servira principalement à la production d'électricité, sans toutefois négliger d'autres utilisations, telles le chauffage, la traction, etc., où elle viendrait se substituer aux combustibles liquides naturels qui risquent peut-être de se faire rares vers la fin de ce siècle.

Perspectives de développement de la production d'énergie dans la République tchécoslovaque et importance de l'énergie nucléaire utilisée à des fins pacifiques

par Augustin Ševčík

La nécessité de prévoir le développement futur d'une industrie déterminée est d'autant plus impérieuse que cette industrie exige de plus grands investissements de capitaux, des délais plus longs pour la construction des installations et que sa technologie évolue plus rapidement. Cette remarque s'applique avant tout à la production d'énergie électrique, même à partir des ressources classiques. Or, il existe déjà, dans la science de l'énergie, une tradition en ce qui concerne cette planification, et les entreprises de production d'énergie ont les moyens de construire rationnellement des centrales et des réseaux.

Pour déterminer quelles sont, du point de vue économique, les perspectives de développement de l'utilisation de l'énergie nucléaire, il est nécessaire d'évaluer longtemps à l'avance le niveau de la consommation d'énergie. La technologie de la production de l'énergie électrique (et des autres formes d'énergie utilisées) à partir de l'énergie nucléaire, exige un volume exceptionnel de recherches et d'études. Pour tout cela, il faut un outillage technique onéreux et un nombreux personnel qui devra, dans la plupart des cas, avoir reçu une longue formation.

Au début, la construction de centrales électronucléaires de grande envergure devra forcément se faire en un certain nombre d'étapes, dont le coût sera plus élevé que pour les autres centrales. Ce n'est qu'après avoir complètement exploré ce domaine tout nouveau que l'on pourra s'attendre à une réduction des dépenses. En plus des centrales, il faudra créer une industrie pour le traitement des combustibles nucléaires dont la technologie semble, dans un certain sens, entraîner des problèmes encore plus délicats que la construction même des centrales. Ces problèmes ne peuvent être résolus qu'à grande échelle; aussi doit-on, avant tout, procéder à une évaluation approfondie des moyens et des efforts à engager.

Pour établir ces perspectives d'avenir, nous ne pouvons tabler que sur une analyse de la consommation d'énergie dans le passé et des facteurs qui influent sur cette consommation; il faudra ensuite déterminer comment ces facteurs pourront agir à l'avenir.

CONSOMMATION D'ÉNERGIE

En général, on peut distinguer deux grands groupes dans la consommation d'énergie : premièrement l'utilisation de l'énergie aux fins de production dans l'industrie, l'agriculture et les transports; et, deuxièmement, son utilisation pour les besoins directs de l'homme — tant collectifs qu'individuels.

On peut évaluer l'utilisation de l'énergie électrique dans l'industrie par rapport à la fabrication de produits déterminés et par rapport aux heures de travail effectif. D'une part, l'énergie dépensée par unité de production, c'est-à-dire la *dépense spécifique d'énergie*, diminue en même temps que diminuent les pertes nées du mode d'utilisation; mais, d'autre part, on met constamment au point de nouveaux procédés d'utilisation de l'énergie qui permettent de réduire de plus en plus le travail manuel et de perfectionner le processus de production, ce qui a pour effet d'augmenter la dépense spécifique. La dépense spécifique d'énergie électrique augmente de façon particulièrement marquée quand cette énergie agit non plus sous forme mécanique mais sous forme chimique ou thermique. Dans ce cas, il s'agit souvent d'une nouvelle forme de production, rendue possible précisément par l'utilisation de l'énergie électrique; parfois, cette nouvelle forme de production se développe jusqu'à devenir une nouvelle branche d'industrie. Le rapport entre la dépense d'énergie et le nombre d'heures de travail — ce que l'on appelle le facteur d'équipement énergétique

Original : russe.

du travail — augmente constamment. Au début, il s'agit simplement de réduire l'effort musculaire; mais ensuite on voit se modifier la participation directe des ouvriers au processus de production : ils n'ont plus qu'à conduire des machines et, en fin de compte, qu'à surveiller le bon fonctionnement de machines automatiques. Ainsi, le processus du travail s'intensifiant de plus en plus, l'équipement énergétique du travail s'accroît suivant une formule hyperbolique, cela à mesure que le rôle du travail physique devient une fraction minime de ce qu'il était à l'origine.

Les trois grandeurs précitées : la quantité produite A, le nombre d'heures de travail effectif L, et la dépense E, sont encore reliées entre elles par le rapport : quantité produite par heure d'ouvrier, c'est-à-dire par la productivité du travail. Étant donné la dépense spécifique d'énergie $n = \frac{E}{A}$; l'équipement énergétique du travail $m = \frac{E}{L}$; la productivité du travail $p = \frac{A}{L}$; on a l'équation

$$p = \frac{m}{n}.$$

Il est facile de prouver qu'une équation analogue définit aussi les accroissements relatifs de ces quantités :

$$K_A = \frac{A_2}{A_1} \qquad K_L = \frac{L_2}{L_1} \qquad K_E = \frac{E_2}{E_1}$$

$$k_n = \frac{K_E}{K_A} \qquad k_m = \frac{K_E}{K_L} \qquad k_p = \frac{K_A}{K_L}$$

$$k_p = \frac{k_m}{k_n}$$

Cela veut dire que la productivité du travail augmente en raison directe des facteurs d'équipement énergétique du travail et en raison inverse de la dépense spécifique d'énergie. On peut considérer cette relation comme le facteur fondamental du développement de la consommation d'énergie; en effet, l'économie d'énergie et la diminution des pertes ne réussiront jamais à en restreindre l'emploi de façon générale; au contraire, il en résultera une augmentation plus rapide de la production industrielle et, par conséquent, une consommation encore plus grande d'énergie. Étant donné l'essence même du progrès, la production des biens matériels ira toujours en augmentant, sous réserve que l'évolution économique se fasse régulièrement et sans crises, c'est-à-dire à condition qu'il y ait équilibre entre le pouvoir d'achat de la population et la production des marchandises de grande consommation. On ne peut donc s'attendre que l'augmentation de la consommation d'énergie puisse s'arrêter ou même subir un ralentissement notable.

L'augmentation incessante de la consommation d'énergie dans la production industrielle est due à des causes économiques. L'extension continue de l'emploi de l'énergie électrique repose sur la réduction de son coût de revient, qui, à son tour, découle des progrès techniques de la production d'énergie. Dans les centrales thermiques, cette réduction s'obtient par une augmentation du rendement global, grâce aux progrès de la technologie des matières premières et de la construction mécanique qui permettent même de contrebalancer le renchérissement du combustible. Dans les centrales hydroélectriques, la diminution du coût de l'énergie électrique est basée sur le développement de la technique de la construction, qui permet de construire des centrales de plus en plus grandes, avec une production d'énergie proportionnellement plus grande, compte tenu des capitaux investis. Ce progrès des centrales thermiques et hydrauliques est la conséquence d'une concentration plus poussée de la production d'énergie dans de vastes installations, elles-mêmes intégrées à d'énormes réseaux d'énergie électrique.

Il existe une relation directe entre la baisse du coût de l'énergie et ses applications à de nouveaux processus technologiques, qui entraînent une augmentation des dépenses spécifiques mais permettent, en fin de compte, d'abaisser le prix de revient du produit (indépendamment des propriétés et de la qualité obtenues), lequel ne peut devenir rentable que par cette méthode. Pour mieux apprécier l'importance de l'abaissement du prix de l'énergie électrique et de l'énergie en général, il suffit d'observer que la dépense d'énergie intervient très fréquemment au cours du processus de production d'un produit donné, que ce soit pour la fabrication même de ce produit ou pour la construction des machines nécessaires, bâtiments, etc.

S'il existe des limites au développement de l'utilisation de l'énergie électrique, ce n'est pas que cette utilisation ne soit pas rationnelle, mais bien à cause du rythme d'accroissement de la production d'énergie électrique; et ce rythme dépend lui-même des moyens que l'économie nationale peut mettre à sa disposition. La proportion existant entre le capital immobilisé et le coût annuel de la production, ou la durée d'amortissement du capital investi, est d'une importance capitale. Pour la construction des centrales et des réseaux électriques, on est obligé d'immobiliser une forte proportion du revenu national, et c'est cela qui impose une limite à la consommation d'énergie électrique. On peut s'en rendre compte dans les pays où les centrales hydrauliques sont en majorité; il semblerait que le bas prix de l'énergie électrique aurait dû favoriser une augmentation rapide de la consommation d'électricité; or, on constate précisément dans ces pays une augmentation plus lente que dans les pays où les centrales thermiques sont en majorité.

L'énergie électrique est la forme d'énergie la plus maniable; elle est de première importance, au point de vue économique, pour l'augmentation de la productivité du travail. Mais pour évaluer avec exactitude son importance, il faut aussi tenir compte du développement de l'emploi des autres formes

d'énergie. Pour cela, il faut considérer l'évolution générale du bilan énergétique, dans lequel figurent aussi les combustibles solides, liquides et gazeux, ainsi que l'énergie hydraulique, en tant que sources primaires. Le bilan énergétique total d'un pays s'est mis aussi à augmenter, quoique à un rythme annuel plus faible, à partir du moment où l'énergie électrique a commencé à remplacer les combustibles pour la production de vapeur. Mais, là encore, les conditions économiques ont joué un rôle. Le volume du bilan énergétique s'est d'abord rapidement accru dans les premiers temps de l'industrialisation, alors que l'on pouvait extraire le charbon à bon marché et que le rapport entre les prix des produits industriels et les salaires était favorable. Le rythme du développement de l'extraction du charbon, puis le volume même de l'extraction, ont diminué quand a commencé à se développer l'emploi de matières premières moins chères, comme le pétrole et le gaz naturel.

Le côté « consommation » du bilan énergétique comprend : l'énergie électrique, le combustible dépensé pour le transport, pour la métallurgie ou la chimie et pour le chauffage. On peut alors distinguer les processus à haute, moyenne et basse température (dans le premier cas, il s'agit de la grosse métallurgie, de l'industrie métallurgique, de la céramique, etc.). Faute de données statistiques pour des périodes assez longues, on peut déterminer l'accroissement des divers postes du bilan énergétique d'après le développement des branches d'industrie qui emploient surtout une certaine forme d'énergie. Par exemple, l'accroissement de l'emploi d'énergie thermique à températures moyennes peut être établi d'après le développement des industries de l'alimentation, du coton et du papier et, pour ces dernières décennies, par celui de l'industrie chimique des matières synthétiques. Cette dernière branche fournit le meilleur exemple du fait que l'utilisation de l'énergie thermique augmente elle aussi à mesure que des prix plus favorables pour l'énergie permettent d'entreprendre la fabrication de nouveaux produits : les dépenses spécifiques en énergie commencent par augmenter peu à peu, puis elles diminuent à mesure que l'industrie s'adapte aux nouvelles techniques. L'abaissement du coût de la chaleur utilisée ainsi que du coût de l'énergie électrique, est provoqué ici par la production conjointe de ces deux formes d'énergie dans les centrales thermiques.

Dans les transports, l'emploi des diverses sortes d'énergie présente des caractéristiques particulières. Pour les transports routiers et aériens, ce qui importe surtout c'est le rapport entre le poids du moteur et la réserve d'énergie, d'une part, et la charge utile, d'autre part. C'est pourquoi, dans ce domaine, on utilise de préférence le combustible liquide, pour lequel ce rapport est plus favorable que pour les autres modes de traction, et il en sera ainsi durant longtemps. Dans les transports par chemin de fer, ce rapport n'a plus autant d'importance; aussi utilise-t-on les sources d'énergie suivantes : le charbon, le pétrole et aussi l'énergie électrique. Ce qui est déterminant dans ce cas, c'est la facilité d'accès de ces sources. Le pétrole, qui est la source d'énergie propulsive la plus avantageuse, n'est pas toujours disponible; il est utilisé de préférence là où il permet de réaliser le plus d'économies et lorsque le taux d'utilisation du matériel est faible.

Le charbon, cette source initiale de l'énergie propulsive dans la plupart des pays, est remplacé par l'énergie électrique même là où on le trouve en abondance, mais surtout pour les lignes à fort trafic. L'ampleur de l'électrification dépend dans une certaine mesure de la possibilité d'employer le pétrole pour la traction; cependant, ce fait ne joue pas un très grand rôle dans la consommation d'électricité d'un pays dans son ensemble.

Dans l'agriculture, l'utilisation de l'énergie propulsive présente les mêmes caractéristiques que son emploi dans les transports routiers; mais dans ce domaine, on utilise presque exclusivement le pétrole. En revanche, dans le cas de la consommation stationnaire, il est plus pratique d'utiliser l'énergie électrique, surtout dans les villes où la densité de la population est très grande et dans les régions à la fois agricoles et industrielles. En effet, dans ces régions, la situation est favorable à l'électrification, parce que, dans la plupart des pays industrialisés la production agricole est insuffisante et qu'on peut l'accroître en utilisant des méthodes plus intensives en agriculture. La consommation d'électricité augmente également beaucoup lorsqu'on a recours à l'irrigation artificielle, dont l'opportunité se manifeste toujours davantage. Si l'on envisage des perspectives à long terme, il faut aussi tenir compte largement de la possibilité de compléter l'apport des sources naturelles d'énergie thermique et radiante par de nouvelles sources artificielles, dès que le prix en aura suffisamment été baissé.

Les besoins directs de la population déterminent un autre groupe d'utilisations de l'énergie; celui-ci ne représente qu'à peu près 10 à 20 pour cent du total de la consommation, mais on peut s'attendre dans ce domaine à un nouveau développement. Dans ce cas, l'énergie contribue directement à améliorer le niveau de vie, à rendre le cadre plus agréable, à faciliter les travaux ménagers et à jeter les bases matérielles du progrès culturel.

On ne peut se représenter, à l'heure qu'il est, une famille moderne sans radio, sans télévision, sans frigidaire et autres appareils ménagers; il n'y a aucune raison de craindre que, dans ce domaine, les inventions nouvelles se fassent plus rares. Quoique le progrès technique puisse parvenir à rendre ces appareils plus économiques, il est certain que la consommation générale d'énergie par habitant ira toujours en augmentant; et cette augmentation s'accélérera jusqu'au moment où le prix de revient permettra d'utiliser largement l'énergie électrique pour le chauffage, même dans les pays où les conditions économiques ne l'ont pas encore permis.

C'est ainsi que se développera aussi la consommation collective pour l'éclairage des rues, des édifices publics, le transport urbain, etc.

Des considérations qui précèdent, relatives à l'influence de ces divers facteurs sur l'augmentation de la consommation d'énergie dans le cadre du développement économique des divers pays, on peut conclure qu'il n'y a pas de raisons de s'attendre à ce que l'augmentation de la consommation d'énergie, surtout de l'énergie électrique, se ralentisse dans l'avenir, en admettant que son coût continue à diminuer. Il en est ainsi pour les sources classiques d'énergie et celles qui sont encore peu répandues, chacun des deux groupes devant épauler l'autre. Il nous reste donc à analyser les perspectives économiques de la production d'énergie à partir de ces différentes sources.

PRODUCTION D'ÉNERGIE

L'un des facteurs les plus importants pour la production d'énergie d'un pays donné est le degré de son développement industriel.

Les pays où l'industrie commence seulement à se développer sont dotés, dans la plupart des cas, des ressources naturelles favorables à la création d'une industrie de production d'énergie; ils peuvent, sans investissements considérables, exploiter leurs mines de charbon, leurs gisements pétrolifères et construire à bon compte des centrales hydrauliques. Le facteur déterminant est donc l'obtention des capitaux indispensables.

Dans les pays à vieille tradition industrielle, il faut, au contraire, compter avec le fait que les sources naturelles d'énergie les plus favorables sont déjà plus ou moins épuisées et que, pour assurer un développement ultérieur de la consommation d'électricité, il faut avoir recours à des sources qui exigent des investissements toujours plus importants. Par contre, la base industrielle dont ces pays disposent permet de résoudre plus facilement de difficiles problèmes de technique, de matériel et de production. Ces pays possèdent déjà une précieuse réserve de travailleurs qualifiés; une fois formés, ceux-ci donneront suffisamment de spécialistes pour cette nouvelle branche de l'industrie, où savants et techniciens sont indispensables. Il existe dans ces pays, et surtout dans les régions à grand développement industriel, de fortes densités de population; certes, il est parfois difficile d'assurer la pureté de l'atmosphère ou le ravitaillement en eau, de resserrer le réseau ferroviaire, etc. mais cette concentration démographique et industrielle constitue une base favorable pour la centralisation de la fourniture d'énergie.

On peut, dans ces pays-là, considérer comme rationnelle la construction de centrales de 100 000 kW au moins. Étant donné la proportion entre la consommation d'énergie thermique et électrique, 30 pour cent, voire 50 pour cent des centrales à construire pourront assurer en même temps la fourniture de vapeur et d'eau chaude.

En tenant compte de l'éventualité d'un renchérissement graduel des ressources naturelles classiques d'énergie, il sera peut-être opportun, dans ces pays, d'affecter une partie des investissements à la mise au point et au développement de la production d'énergie d'origine nucléaire. En effet, s'il est certain que les sommes à investir seront plus fortes pendant un certain temps, on doit aussi tenir compte du fait qu'elles pourront ensuite devenir inférieures aux sommes à investir dans la construction des centrales thermiques.

Il semble contraire à toute l'expérience de l'histoire de l'humanité, que l'utilisation de l'énorme potentiel représenté par l'énergie nucléaire ne réussisse pas, malgré toutes les difficultés initiales, à atteindre le degré de développement qui lui assurera la prédominance sur les autres formes d'énergie. L'immensité de ce potentiel justifie précisément un tel espoir, et c'est elle qui différencie l'énergie nucléaire d'autres formes d'énergie tout aussi extraordinaires, mais de faible potentiel, dispersées jusqu'à ce jour sur des espaces si vastes et en des masses si énormes que leur utilisation exigerait toujours des installations considérables.

Si l'on tient compte du fait que le pouvoir calorifique du combustible nucléaire est de 3 à 6 millions de fois plus grand que celui du charbon, on voit que même si la proportion d'uranium dans le minerai n'est que de 1 pour cent, la masse à traiter est presque 100 000 fois plus petite. Certes, ce combustible est beaucoup plus difficile à traiter, mais nous disposons là d'une base matérielle pour obtenir un produit final moins cher que le charbon ou n'importe quel autre combustible. En même temps, la nature même du processus de traitement du combustible et de l'exploitation des centrales nucléaires appelle leur automatisation, c'est-à-dire qu'on se rapproche des formes que revêtira plus tard le labeur humain. Enfin, au bout d'un certain temps, qu'il est d'ailleurs difficile d'évaluer maintenant, on parviendra, grâce à la connaissance des réactions nucléaires des éléments lourds, à mettre au point les moyens d'utiliser l'énergie de liaison des noyaux d'éléments légers, et l'on ne se heurtera plus à l'ultime et difficile problème qui consisterait à trouver de nouveaux gisements d'uranium et de thorium. Il semble que personne aujourd'hui ne mette en doute l'opportunité de s'adresser à l'énergie nucléaire pour transformer notre économie énergétique et pour résoudre de nouveaux problèmes dans le domaine de la science en particulier et de l'activité humaine en général, domaine dont les perspectives ne font encore que s'entrouvrir. Il ne reste plus qu'à déterminer l'ampleur des ressources économiques actuelles qu'exigera cette nouvelle phase du progrès humain, et à déterminer pendant combien de temps cette nouvelle activité devra emprunter aux autres branches de l'économie avant de leur restituer beaucoup plus d'ailleurs qu'elle n'aura reçu. L'immense

contribution que les milieux scientifiques de tous les peuples auront apportée à la présente Conférence permettra certainement d'élucider en grande partie ce problème et de trouver les moyens de le résoudre pratiquement.

LES PERSPECTIVES DU DÉVELOPPEMENT DU SECTEUR ÉNERGÉTIQUE DANS LA RÉPUBLIQUE TCHÉCOSLOVAQUE

En se fondant sur le vaste travail de recherche effectué par un ensemble de spécialistes des questions énergétiques, on peut énoncer, sur les perspectives de développement de l'économie énergétique de la Tchécoslovaquie, les conclusions suivantes :

1. Pendant les cinq à dix prochaines années, les conditions économiques de la production d'énergie ne changeront guère. Les proportions de l'énergie hydraulique et de l'énergie thermique resteront à peu près les mêmes, les coûts de production baissant lentement. La part des investissements du secteur de l'énergie dans le montant total des investissements industriels restera à peu près inchangée.

La consommation d'énergie augmentera de 10 à 12 pour cent par an et elle atteindra donc 40 à 46 milliards de kilowattheures en 1956.

2. Dans un avenir plus éloigné, on ne prévoit pas d'arrêt dans cette évolution du fait d'une augmentation des frais de production provoquée par l'utilisation de sources d'énergie moins accessibles; ces difficultés seront surmontées grâce à la diminution des frais de production de l'énergie électrique.

On peut donc évaluer la consommation d'énergie électrique en 1975 à 80-100 milliards de kilowattheures.

Le développement ultérieur de l'énergie électrique ne peut avoir que peu d'influence sur les moyens de résoudre le problème de l'utilisation de l'énergie nucléaire. La question des réserves d'énergie, par exemple des réserves d'uranium-235, ne peut pas non plus jouer un rôle décisif; en effet, on peut supposer que, vers 1975, le problème de la régénération des matières désintégrées étant totalement résolu, les réserves de combustible nucléaire augmenteront sensiblement. Une fois résolu le problème de l'utilisation de l'énergie de liaison des noyaux légers, les ressources d'énergie seront pratiquement illimitées. De même, il faut s'attendre vers cette époque à une transformation fondamentale des méthodes d'utilisation de l'énergie. Une évaluation des perspectives d'avenir après 1975 comporte donc trop d'inconnues et ne peut être qu'extrêmement problématique.

En ce qui concerne la possibilité de satisfaire la demande future d'énergie dans les proportions que nous avons indiquées, les vues d'ensemble concernant les ressources hydroélectriques sont tout à fait complètes : les données relatives à la superficie, à la hauteur de chute, à la répartition et à la densité des précipitations, montrent que la totalité de l'énergie hydraulique techniquement exploitable en Tchécoslovaquie équivaut à peu près à la consommation globale d'énergie électrique; or, elle n'est exploitée aujourd'hui que dans la proportion de 10 pour cent.

Pour toutes les sources d'énergie hydraulique les plus importantes de Tchécoslovaquie, des plans d'aménagement ont été élaborés; dans certains cas, on a évalué les investissements spécifiques en capitaux par unité de construction annuelle. Les résultats de ces calculs sont joints au présent rapport sous forme de pourcentages. Compte tenu de la baisse probable des prix des travaux de construction, il serait évidemment rationnel, économiquement parlant, d'aménager 55 à 65 pour cent des ressources hydrauliques connues. Pour déterminer ce pourcentage et établir les projets des futures centrales, il est de la plus haute importance de réserver les masses d'eau nécessaires pour l'industrie, l'agriculture et les besoins de la population. Étant donné la densité de la population et le haut degré d'industrialisation de la Tchécoslovaquie, ce sont là des facteurs plus importants que l'utilisation même de l'énergie électrique.

Il est plus difficile de procéder à une évaluation analogue pour les possibilités d'exploitation des réserves de combustibles, car les recherches à entreprendre à cet égard, quoique de même nature que pour les réserves hydrauliques, sont considé-

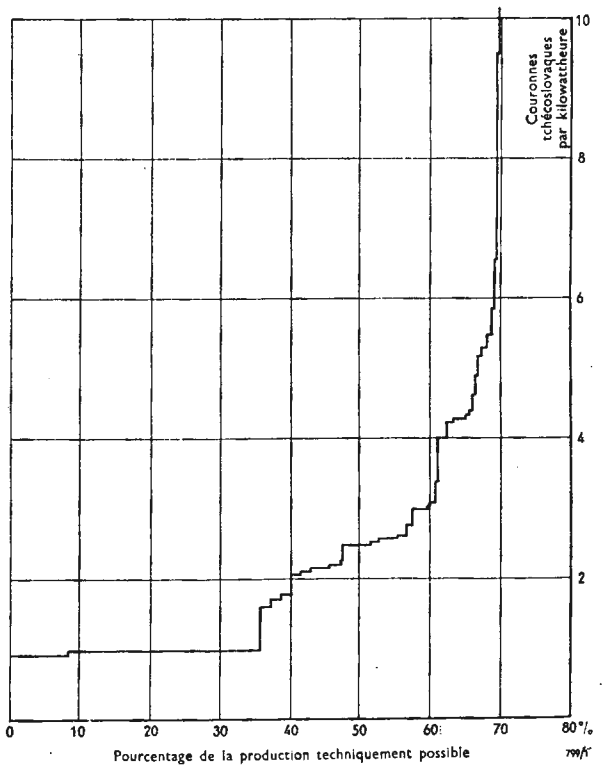


Figure 1. — Investissements spécifiques dans les centrales hydrauliques de la République tchécoslovaque.

rables. Certaines quantités de combustibles se trouvent à de grandes profondeurs, dans des conditions géologiques peu favorables, à proximité d'eaux souterraines, ou bien elles sont dispersées en petits bassins ou en couches de faible épaisseur, ce qui rend leur exploitation peu avantageuse du point de vue économique.

Pour l'utilisation du charbon, il faut tenir compte de sa qualité. En évaluant les perspectives d'avenir, il faut tabler sur l'exploitation optimum des diverses sortes de charbon pour la métallurgie et l'industrie chimique; il s'agit donc de réserver à la production d'énergie tous les charbons de qualité inférieure et les résidus du lavage. Si, dans le passé, on brûlait

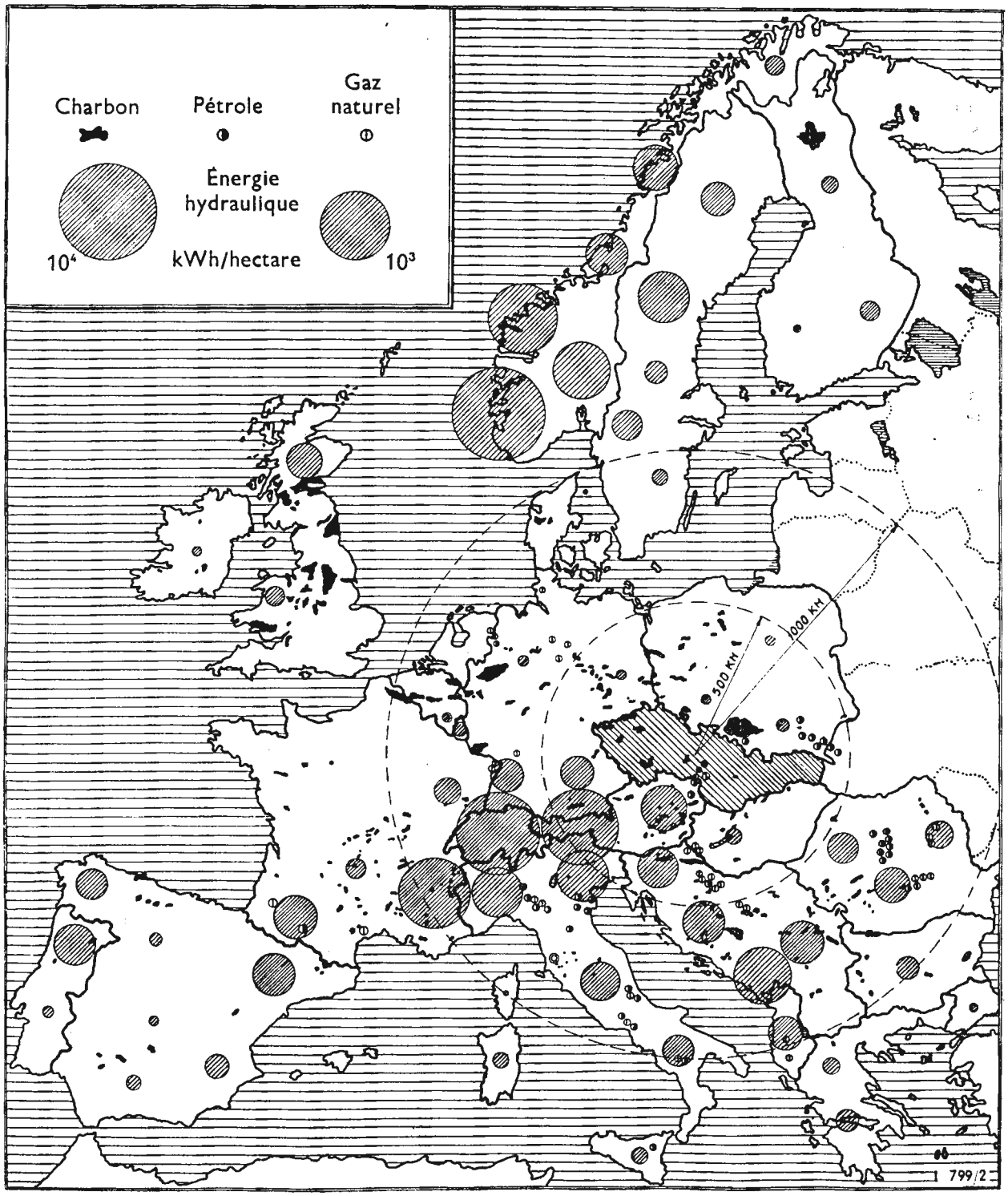


Figure 2. — Ressources énergétiques de l'Europe.

dans les foyers des chaudières même un combustible de bonne qualité, il serait maintenant souhaitable de réserver ces charbons à la métallurgie et à l'industrie chimique. On pourrait alors n'augmenter que de très peu l'extraction de ces combustibles. Pour la production d'énergie, il faudra soit avoir recours aux combustibles de qualité inférieure, provenant même de mines peu accessibles et donc de gisements plus onéreux, soit utiliser de nouvelles sources d'énergie.

Les perspectives d'extraction du pétrole en Tchécoslovaquie n'intéressent que les transports et l'agriculture; les ressources nationales en pétrole ne peuvent influer sur la production d'énergie électrique ou de chaleur. Il en est de même pour le gaz naturel; une fois satisfaites les demandes de la métallurgie, celui-ci, ainsi que le gaz de coke disponible, pourra être réservé avantageusement aux industries chimiques et à l'approvisionnement des villes et des centres industriels.

L'étendue des sources d'énergie naturelles est évidemment le problème le plus important, mais une autre question capitale est leur localisation par rapport aux centres de consommation. Malgré la forte densité de la population en Tchécoslovaquie, le transport de l'énergie peut augmenter considérablement son prix de revient. Il en est surtout ainsi lorsque, par manque d'eau, il est difficile de construire des centrales électriques à proximité des bassins houillers, ou lorsqu'il n'est plus possible de transporter le combustible par chemin de fer.

Dans ces conditions, on ne peut guère compter que les frais d'exploitation des centrales diminueront progressivement dans l'avenir. C'est surtout le rapport entre les investissements et les frais d'exploitation qui augmente, du fait qu'il faut utiliser la vapeur avec des paramètres plus élevés et que l'adduction d'eau, le transport de l'énergie par câbles et le transport du combustible par chemin de fer deviennent plus onéreux. La même situation se présente pour l'énergie hydraulique.

Les devis élaborés montrent que, jusqu'en 1965, on pourra assurer la fourniture des quantités indiquées au moyen des ressources existantes, à condition d'y consacrer les investissements et dépenses d'exploitation nécessaires. Par contre, une augmentation ultérieure de la production s'accompagnerait certainement d'une augmentation sensible des dépenses.

La figure 2, extraite d'une publication de l'Organisation des Nations Unies de 1952 (E/ECE/151), montre la répartition du potentiel hydroélectrique et des sources de production thermique. Il est clair que les quantités d'énergie qui pourraient être amenées de l'étranger sont insignifiantes si l'on tient compte des distances et des difficultés de transport.

On peut en conclure que, pour la Tchécoslovaquie, l'utilisation de l'énergie nucléaire revêt une importance particulière. Cette forme d'énergie pourrait couvrir à elle seule toute l'augmentation de la production d'énergie électrique de 1965 à 1975, et remplacer en partie la production d'électricité fournie jusque-là par les centrales thermiques, étant donné l'épuisement des gisements charbonniers. Les centrales électronucléaires devraient donc produire 20 milliards de kilowattheures vers 1970 et 60 milliards en 1975. Or, on ne peut tabler sur un tel développement en cinq ans. Il faudrait donc que la production des centrales électronucléaires atteigne déjà en 1965 près de 2 milliards de kilowattheures.

Pour mettre en relief l'importance de cette utilisation de l'énergie nucléaire, nous donnons les quelques indications qui suivent :

1. En 1970, près du tiers de la production d'électricité devrait être fourni par des centrales électronucléaires. En supposant que le prix de l'électricité d'origine nucléaire soit inférieur de 15 pour cent au prix de l'électricité produite par d'autres moyens, le coût moyen de l'énergie sera abaissé de 5 pour cent.

2. Si l'on compte qu'à partir de 1965 il ne sera plus nécessaire d'augmenter l'extraction du charbon, le nombre des mineurs diminuera de 20 pour cent. Il n'en serait pas de même si, faute de pourvoir obtenir cette même quantité d'électricité des centrales nucléaires, il fallait se résoudre à exploiter des mines peu accessibles (et à rendement inférieur à la moyenne).

3. L'exploitation des centrales électronucléaires et des usines radiochimiques correspondantes exigera quelques milliers de travailleurs hautement qualifiés, ce qui modifiera encore la proportion entre le nombre des ingénieurs et techniciens et l'effectif des travailleurs manuels employés à des travaux pénibles.

On ne peut chiffrer complètement l'importance des travaux scientifiques qu'il faudra entreprendre pour résoudre tous les problèmes posés par l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques. Le fait que cette discipline scientifique sera devenue partie intégrante des programmes d'enseignement influera nécessairement sur notre connaissance de la nature, et par cela même, contribuera à renforcer une conception du monde fondée sur la connaissance de la nature et de la vie elle-même. Il contribuera aussi au progrès de la culture et à l'amélioration des conditions de vie grâce au relèvement du bien-être matériel de la société humaine.

L'utilisation de l'énergie au Japon : le présent et l'avenir

par Koichi Aki *

En termes de statistique, la consommation d'énergie au Japon s'est élevée en 1953 à 1,24 tonne par an et par habitant, en équivalent d'un charbon donnant 6 500 kilocalories par kilogramme. Même si la production industrielle devait s'accroître à l'avenir, l'accroissement de consommation qui en résulterait absorberait sans doute toute l'énergie produite du fait de cette augmentation de la production.

L'énergie produite dans le pays en 1953 se répartissait de la façon suivante entre les différentes sources : charbon, 47,7 pour cent; énergie hydraulique, 35,5 pour cent; bois de feu et charbon de bois, 16 pour cent; pétrole, 0,6 pour cent et gaz naturel, 0,1 pour cent.

Si l'on tient compte de l'énergie importée, les proportions deviennent les suivantes : charbon, 46,6 pour cent; énergie hydraulique, 29,6 pour cent; bois de feu et charbon de bois, 11 pour cent et pétrole, 12,8 pour cent, pour la totalité de l'énergie dont la consommation est connue pour cette même année. Si l'on fait figurer l'énergie électrique sous une seule rubrique, incluant celle qui est d'origine thermique et celle qui est d'origine hydraulique, l'électricité représente 36 pour cent de l'énergie totale et le charbon 40 pour cent. La consommation de pétrole a été couverte par les importations à raison de 95 pour cent environ, et celle de charbon à raison de 10 pour cent environ.

Depuis 1886, la consommation d'énergie a augmenté dans de très fortes proportions à mesure que le pays s'industrialisait. Cela est particulièrement vrai de la production de charbon. On peut dire que le charbon a joué un rôle de toute première importance dans l'industrialisation du pays.

Dans les années qui précédèrent immédiatement la première guerre mondiale, environ 60 pour cent de toute l'énergie consommée au Japon ont été tirés du charbon, le reste provenant en majeure partie du bois de feu. L'énergie hydraulique a fait son apparition à la fin du siècle dernier et son importance s'est graduellement accrue. Après 1920, le pétrole a représenté une nouvelle source d'énergie. Depuis lors, chacune de ces sources a participé conjointement avec les autres à la vie économique du pays, selon un plan d'ensemble rationnel, certaines fournissant la force motrice et d'autres la chaleur. C'est ainsi que la structure de la consommation d'énergie s'est constamment et profondément modifiée à mesure que le chiffre absolu de la consommation totale augmentait. En 1953, le Japon produisait 46,5 millions de tonnes de charbon et en importait 4,7 millions de tonnes; il tirait 43 milliards de kilowattheures de ses centrales hydrauliques et 14,4 milliards de kilowattheures de ses centrales thermiques; il produisait 330 000 kilolitres de pétrole, et en importait 8,7 millions de kilolitres; quant à la production de bois de feu et de charbon de bois, en grumes, elle atteignait 22 millions de tonnes.

En résumé, le total des ressources en énergie du Japon en 1953 équivalait à 108 millions de tonnes d'un charbon fournissant 6 500 kilocalories par kilogramme.

La consommation d'énergie par habitant était de 0,4 à 0,5 tonne d'équivalent de charbon vers 1890; à cette époque, la part du bois de feu et du charbon de bois dans cette consommation était d'environ 80 pour cent. Elle a atteint 0,8 à 0,9 tonne vers 1925 et un maximum de 1,58 tonne en 1940, la houille et l'énergie hydraulique comptant pour une part plus importante dans le total. Elle était retombée à 0,67 tonne en 1945, pour remonter en 1953 à 1,24 tonne d'équivalent de charbon. Il va sans dire que la consommation par habitant ne suffit pas à elle seule à fournir une image complète de la production, puisqu'il faut tenir compte de la manière dont l'utilisation de l'énergie s'est répartie entre divers postes : éclairage, chauffage et force motrice ou besoins ménagers, transports et utilisations industrielles, et du rendement thermique de la consommation, qui est fonction de l'état du progrès technique. Mais le niveau de la consommation traduit en tout cas le développement économique continu du pays. Une analyse de la consommation de charbon ne tenant compte que des plus gros consommateurs a montré que les utilisations industrielles, qui intervenaient pour 45,3 pour cent au cours des années 1930 à 1934 (chiffre moyen pour ces cinq années), absorbaient 73,1 pour cent en 1953.

Original : anglais.

* Vice-Président du Conseil des ressources, Cabinet du premier ministre.

LA DEMANDE D'ÉNERGIE DANS L'AVENIR

Aux environs de 1870, la population de l'archipel japonais ne s'élevait qu'à 36 millions d'habitants environ. Elle était de 83 200 000 âmes en 1950. C'est surtout la population ouvrière du pays qui s'est accrue, la population rurale n'ayant augmenté que de 40 pour cent par rapport au chiffre de 1870. L'Institut d'études démographiques du Ministère de l'assistance sociale prévoit que le Japon comptera environ 104 millions d'habitants en 1975. Ce chiffre continuera d'augmenter jusqu'à un maximum qui sera atteint peu après 1990, puis diminuera graduellement pour se stabiliser aux environs de 107 millions en l'an 2000. Malgré la baisse accusée des taux de natalité et de décès qui s'est produite après 1950, on a enregistré en 1954 19,4 naissances et 7,9 décès pour 1 000 habitants. Dans ces conditions, un accroissement net de la population totale se maintiendra pendant quelque temps encore, le taux d'augmentation étant de 1 à 1,2 pour cent. Les modifications intervenues dans les taux de fertilité et de mortalité sont en train de provoquer un changement dans la pyramide des âges. Les groupes plus âgés tendent à prédominer, ce qui entraînera une augmentation régulière de l'effectif de la main-d'œuvre. Les habitants âgés de plus de 15 ans et de moins de 59 ans étaient au nombre de 47 311 000 en 1950. Selon les prévisions, ils seront 69 788 000 en 1975 et 68 000 000 en l'an 2000.

Pour incorporer cet effectif toujours plus considérable de main-d'œuvre, il est absolument nécessaire de développer l'économie du pays. On peut certainement soutenir que l'activité industrielle se développera en directions multiples, provoquant la création de structures industrielles variées et, par là, de répartitions différentes de la consommation d'énergie, ce qui ne manquerait pas de rendre très difficile toute évaluation de la demande future. Nous nous sommes donc efforcés d'évaluer la demande future d'énergie en tenant compte des leçons du passé et en nous bornant à formuler un petit nombre d'hypothèses, qui sont les suivantes :

En supposant un accroissement du produit national net de 50 pour cent en 1975 et de 100 pour cent en l'an 2000, l'année 1950 étant prise comme année de référence, il faudrait que le produit national brut progresse à une cadence plus rapide, soit de 87 pour cent jusqu'en 1975 et de 158 pour cent jusqu'en l'an 2000, pour aller de pair avec l'accroissement de la population. En d'autres termes, l'accroissement du produit national brut entre 1950 et 1975 correspond à un taux annuel composé de 2,5 pour cent jusqu'en 1975 et de 1,3 pour cent ensuite.

Les statistiques portant sur la période 1930-1940, qui passent pour les plus sûres que nous possédions, montrent qu'en 1940 le produit national brut réel était de 144 pour cent plus élevé qu'en 1931, la production industrielle de 181 pour cent, et le total des fournitures d'énergie de 192 pour cent.

En supposant qu'une augmentation cumulative annuelle de 2,5 pour cent du produit national brut réel, ainsi que les pourcentages d'accroissement cités au paragraphe précédent, se maintiennent pendant la prochaine génération, il semblerait que la production industrielle doive exiger des fournitures d'énergie augmentant au rythme de 4,2 pour cent par an, ce qui se traduirait par une augmentation cumulative de 4,6 pour cent de ces fournitures, année après année.

La quantité totale d'énergie fournie en 1950 représente, selon les estimations, l'équivalent de 84 615 000 tonnes métriques de charbon à 6 500 kilocalories par kilogramme. Une évaluation de la consommation totale de combustible qui tiendrait compte du taux annuel composé d'accroissement donnerait, pour 1975 :

$$84\,615\,000 \text{ tonnes métriques} \times (1{,}046)^{25} = 260\,000\,000 \text{ de tonnes métriques}$$

Pour l'an 2000, les mêmes coefficients donneraient un chiffre de 420 millions de tonnes métriques.

L'évaluation de la consommation totale d'énergie que nous venons de citer s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses. Si nous prenons d'autres évaluations pour point de départ, si nous extrapolons ces tendances en tenant compte de la quantité d'énergie fournie par habitant à différentes périodes, et si nous essayons d'évaluer l'ampleur et l'étendue que prendront dans l'avenir les activités industrielles nécessaires à la vie du pays, sans oublier les effectifs de la main-d'œuvre et les progrès de la technique, nous arrivons à la conclusion que l'approvisionnement total en énergie absorberait probablement environ 200 millions de tonnes métriques d'équivalent de charbon en 1975, et environ 400 millions en l'an 2000 (voir fig. 1).

POSSIBILITÉS FUTURES D'APPROVISIONNEMENT EN ÉNERGIE

La plupart des gisements houillers du Japon sont situés dans des terrains tertiaires et leur structure est peu favorable à l'exploitation, en raison des plissements et d'autres accidents du terrain. Les veines sont généralement peu épaisses, discontinues, et d'un contenu bien moins important que celles des gisements d'autres pays producteurs.

Une évaluation des réserves probables de houille du Japon montre que sur les 18,6 milliards de tonnes métriques actuellement reconnues, 4,3 milliards de tonnes environ pourraient probablement être exploitées dans les conditions présentes de la technique.

Les conditions naturelles de l'extraction ont constitué une gêne considérable pour l'industrie houillère japonaise. Ces conditions défavorables se sont encore aggravées récemment, comme il ressort d'une comparaison entre les chiffres de 1949 et de 1931 : l'épaisseur moyenne des veines a diminué de

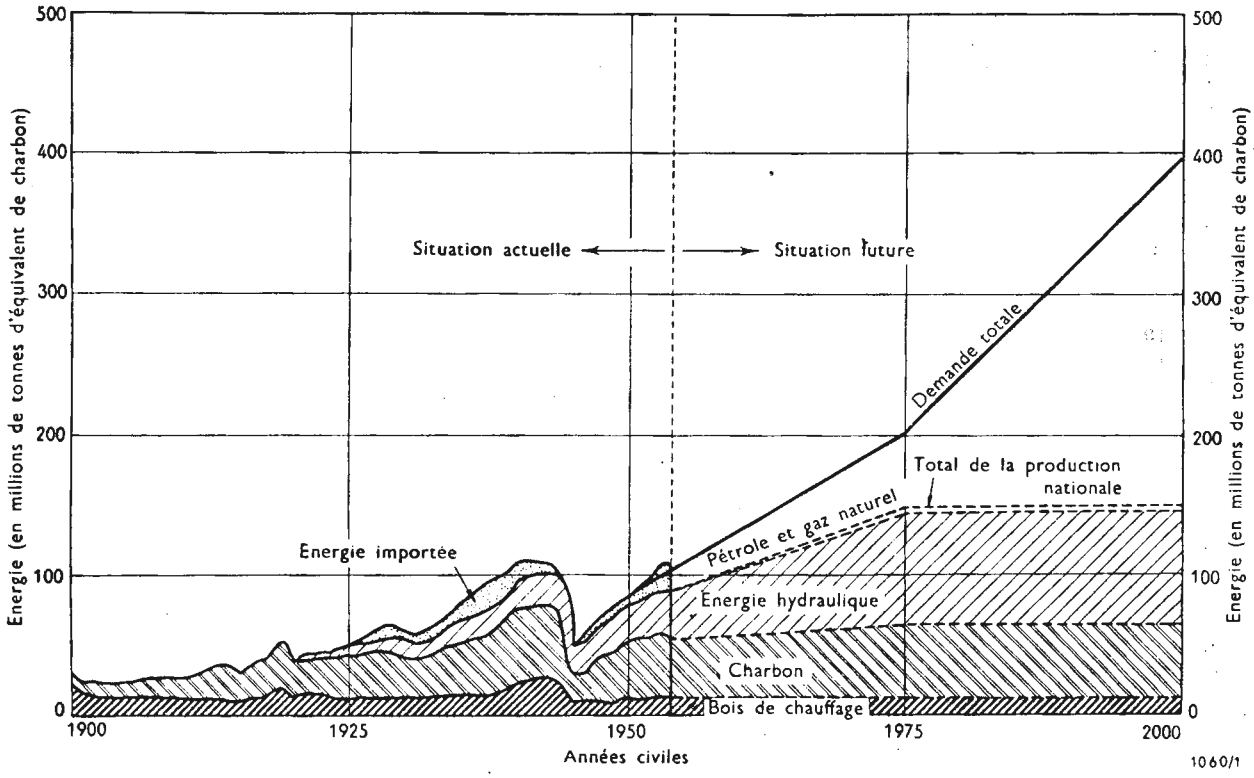


Figure 1. — Production et demande d'énergie au Japon (en équivalent de charbon de 6 500 kilocalories par kg).

9 pour cent, la longueur totale des galeries et des puits qu'il est nécessaire de pratiquer pour extraire une tonne de houille a augmenté de 89 pour cent, et les travaux occasionnés par l'exhaure ont augmenté de 40 pour cent en 15 ans.

Non seulement le tout-venant extrait au Japon est un combustible médiocre, son pouvoir calorifique étant maintenant évalué à 4 790 kilocalories par kilo en moyenne, soit à 14 pour cent de moins qu'il y a 20 ans, mais le pourcentage des qualités marchandes diminue constamment.

Il semble peu raisonnable d'espérer que les mines japonaises donnent un taux annuel d'extraction de houille plus élevé à l'avenir. Les pouvoirs publics n'ont cessé d'envisager la fermeture des mines les plus médiocres, ou l'amélioration des procédés d'extraction, y compris l'ouverture de galeries nouvelles lorsque le besoin s'en fait sentir. Nous supposerons ici, aux fins de notre raisonnement, que l'industrie minière ne pourra sans doute pas apporter à l'économie plus de 55 millions de tonnes de houille par an, dans un avenir proche ou éloigné, même si l'on fait la part des progrès techniques réalisables.

Le prix final à la consommation se situe actuellement entre 0,002 et 0,002 5 dollar par kilocalorie.

De son potentiel hydroélectrique évalué à 22 millions de kilowatts, la puissance maximum autorisée que le Japon a jusqu'ici exploitée était de 7,7 millions de kilowatts à la fin de l'exercice financier 1953. Au rythme actuel de la construction, les sites exploitables seront tous en activité en 1975.

La production d'énergie électrique a commencé avec la fourniture de courant-lumière obtenu dans des centrales thermiques; les procédés de transmission d'énergie à grande distance ont accéléré l'équipement des sources hydrauliques, dont les premières utilisations remontent aux années 1890. Les premières centrales hydrauliques étaient du type dit « au fil de l'eau », qui utilise l'écoulement naturel d'une rivière.

Comme la production d'énergie de ce type est en grande partie fonction du débit naturel, les centrales ont été conçues pour fonctionner avec le débit des périodes de basses eaux. Mais avec l'accroissement de la demande, les centrales plus récentes ont un paramètre d'exploitation correspondant à un débit quatre ou cinq fois plus élevé que celui de la période de basses eaux, étant entendu que des centrales thermiques devront suppléer aux insuffisances de la saison sèche et contribuer à satisfaire la charge de pointe quotidienne.

On construit également, là où les conditions le permettent, mais à une échelle très modeste, d'autres types de centrales hydrauliques, à bassin de retenue ou à réservoir. La quantité totale d'énergie produite par certaines de ces centrales, qui pourraient bénéficier d'un débit régulier pendant chacune des saisons de l'année, ne correspond tout au plus qu'à 5 pour cent de l'approvisionnement du pays en énergie.

L'énergie électrique est produite au Japon par l'exploitation combinée des ressources hydrauliques et des ressources thermiques.

Pour l'exposé actuel, nous estimerons que si les ressources hydrauliques étaient entièrement exploitées, la production totale d'énergie s'élèverait à 103 milliards de kilowattheures pour un fonctionnement d'environ 4 700 heures par an. Actuellement, les centrales fonctionnent probablement à un régime voisin de 5 600 heures. En revanche, l'approvisionnement en charbon des centrales thermiques ne doit guère dépasser 15 millions de tonnes métriques, d'où peuvent être tirés 30 milliards de kilowattheures.

En 1953, les centrales hydrauliques ont produit 43 milliards de kilowattheures pour une puissance de 7,7 millions de kilowatts, et les centrales thermiques ont produit 14,5 milliards de kilowattheures pour une puissance de 4,6 millions de kilowatts. Le coût de production d'énergie aux centrales est estimé actuellement, à 0,007 dollar le kilowattheure, en moyenne, pour l'énergie hydraulique et l'énergie thermique considérées ensemble (le prix de vente uniforme de l'énergie produite par les deux sources est de 0,014 dollar le kilowattheure). Ce coût s'élèvera sans doute de plus de 10 pour cent aux environs de 1960, et continuera peut-être encore à s'élever par la suite, l'exécution de nouveaux projets étant à ce moment-là arrêtée faute de sites économiquement exploitables.

La production nationale de pétrole et de gaz naturel s'élève à 0,5 million de kilolitres en équivalent de pétrole. Cette production ne couvre la demande totale que dans la proportion de 5 pour cent. La production de pétrole est restée à peu près stable depuis 50 ans, avec 0,3 à 0,4 million de kilolitres par an. Les possibilités d'extraction du pétrole en dehors de la zone actuellement exploitée pourront accroître considérablement les réserves du pays en pétrole brut et en gaz naturel. Les résultats de sondages récents donnent à croire que dans le nord du pays, dans la plaine de Kanto et Hokkaido, il existe des nappes suffisamment importantes pour justifier une exploitation commerciale. Le gouvernement étudie actuellement la création d'un régime financier, courant en Occident, mais qui n'a encore jamais été appliqué au Japon, et qui permettrait d'investir des capitaux plus importants dans la prospection du pétrole.

Il semble probable qu'une exploration de grande envergure accompagnée d'essais de laboratoire sera bientôt en cours, et qu'après 1960, on pourrait escompter une production nationale annuelle de pétrole brut et de gaz naturel de l'ordre de 1,5 million de kilolitres.

Aujourd'hui, le bois de feu et le charbon de bois ne sont plus utilisés, à peu d'exceptions près, que pour les besoins ménagers. La quantité de bois consommée annuellement à ces fins est de l'ordre de 22 millions de tonnes métriques, en grumes. Non seulement cette consommation dépasse déjà le produit d'une exploitation judicieuse, mais il y a lieu de croire que la concurrence entre les diverses utilisations du bois se fera toujours plus vive. C'est pourquoi il y a peu de chance pour que ce secteur fournisse des approvisionnements plus importants à l'avenir.

La quantité totale d'énergie qu'il serait possible de produire au Japon jusqu'à la fin de la prochaine génération, en faisant appel aux sources classiques, est probablement de l'ordre de 150 millions de tonnes métriques d'équivalent de charbon, à l'exclusion de toute importation. Il paraît toutefois peu probable que ce niveau puisse être sensiblement dépassé, même après 1975 (voir fig. 1).

RAPPORT ENTRE L'OFFRE ET LA DEMANDE

Dans les chapitres qui précèdent, nous avons évalué la demande probable d'énergie, en 1975 et en l'an 2000, en nous appuyant sur deux hypothèses : *a*) la possibilité d'augmenter le produit national réel net de 50 pour cent d'ici 1975, et de 100 pour cent d'ici l'an 2000; *b*) le maintien au taux de la période 1931 à 1940, du rapport entre l'augmentation de la production industrielle et l'augmentation des quantités d'énergie disponibles. D'après notre calcul, le taux composé serait de 4,6 pour cent pour la quantité d'énergie disponible.

Il vaut la peine de mentionner ici que, pendant les dix années de 1931 à 1940, le taux annuel cumulatif d'accroissement a été plus élevé en ce qui concerne la quantité d'énergie disponible qu'en ce qui concerne la production industrielle, 6,8 pour cent contre 6,1 pour cent.

On serait tenté d'en conclure que, pendant ces dix années, ce sont les industries consommant le plus d'énergie par unité de produit qui ont connu le plus grand développement. En fait, le Japon a alors disposé d'excédents d'énergie vendus à des prix très réduits, et ce sont surtout l'industrie électrochimique et celle du raffinage qui se sont développées au cours de cette période. Si notre conclusion est exacte, il est douteux que le Japon puisse continuer à se développer en donnant à l'avenir la même place, dans sa structure industrielle, aux industries qui sont les plus grosses consommatrices d'énergie par unité de produit.

Dans un pays tel que le Japon, le développement de l'industrie doit être envisagé en tenant compte du type et de la quantité de matières premières que l'industrie aura vraisemblablement à sa disposition, aussi bien que des sources d'énergie et de la situation du marché pour les produits de cette industrie. Dans toute évaluation du développement futur de l'industrie, il convient sans doute d'examiner ces conditions limitatives, avant d'évoquer les progrès de la technique industrielle ou d'essayer de se représenter la structure de l'industrie de l'avenir. De ce fait, la demande future en énergie est très difficile à déterminer. Tout ce qu'on peut dire, c'est qu'il est assurément possible de faire un usage plus rationnel de l'énergie tirée des sources classiques, en améliorant dans l'ensemble le rendement thermique, et en éliminant les utilisations peu judicieuses de l'énergie, s'il s'en trouve.

On pourrait trouver que le total de la demande future en énergie paraît s'établir à un chiffre trop élevé, mais cette évaluation n'est nullement exagérée, comme on le verra si, au lieu de calculer la demande globale, on calcule la demande par habitant. De ce point de vue, et comparée à celle des pays industrialisés, notre évaluation paraît plutôt pécher par défaut que par excès et nous pouvons espérer, en fin de compte, que les évaluations de la demande future en énergie seront compatibles avec les possibilités de réalisation.

Les gisements houillers du Japon se présentent assurément dans des conditions physiques moins favorables que la plupart des gisements exploités dans le reste du monde. En outre, le rapport entre l'extraction annuelle et les réserves estimées est très élevé au Japon, à telle enseigne que l'exploitation représente chaque année un prélèvement très lourd.

Nous nous efforçons de maintenir le coût de production du charbon à son niveau actuel, mais les principaux gisements exploités sont répartis de façon peu favorable entre les deux extrémités du pays. Dans ces conditions, nous sommes contraints de transporter des tonnages considérables de charbon des centres miniers aux centres de grande consommation. Outre ces caractéristiques géologiques et géographiques de nos gisements, qui ont contribué à donner à l'industrie japonaise du charbon des coûts de production relativement élevés, le charbon extrait a été le plus souvent de qualité inférieure. Alors que les mines sont concentrées en deux régions seulement, leurs produits ont été classés en de nombreuses qualités pour satisfaire la demande des consommateurs. Les charbons extraits sont de moins bonne qualité depuis quelques années, aussi l'utilisation intégrale du charbon, et particulièrement du charbon médiocre, est-elle devenue une question d'importance capitale.

Or, il est indispensable de trouver acquéreur pour la totalité des charbons extraits si l'on veut pouvoir freiner la hausse des coûts de production. Un autre élément qui explique le niveau élevé des coûts de production au Japon est que, dans les conditions actuelles, la demande est sujette à des fluctuations beaucoup trop violentes. Il est donc nécessaire de stabiliser la demande, ne serait-ce que pour tirer le meilleur parti du charbon extrait et pour pouvoir le vendre à un prix raisonnable. Notre évaluation des approvisionnements en charbon ne pourra se confirmer que si le plan d'ensemble esquissé plus haut est intégralement réalisé.

Le Japon n'a pas manqué de tirer parti de sa topographie déchiquetée et de ses fortes précipitations, en équipant des centrales hydrauliques. On admet généralement que la somme des ressources hydrauliques du Japon qui se prêtent à l'exploitation est de l'ordre de 22 millions de kilowatts. Or, jusqu'ici, 7,7 millions de kilowatts seulement ont été équipés, ce qui laisse un potentiel inexploité égal aux deux tiers des possibilités.

Il convient cependant de noter que les sites restant à équiper ne pourront l'être qu'au prix de dépenses élevées, en raison surtout de leur situation physique plus défavorable. En outre, l'équipement de ces sites sera probablement considéré comme peu rentable, en raison de leur accès difficile et des dépenses accessoires qui en résulteront.

Nos préférences vont aux rivières à pente douce, que nous pouvons munir de barrages formant réservoir, et qui promettent d'être le type d'installation le plus rentable. Mais, la plupart de ces bassins sont habités jusqu'au cours supérieur des rivières, et l'on y trouve déjà en grand nombre des maisons, des terres arables, des voies de communication et d'autres éléments semblables; il en résulte une difficulté accrue à équiper de nouvelles centrales selon les méthodes classiques, car l'indemnisation ou la réinstallation des personnes lésées pourrait entraîner des frais d'investissement extrêmement élevés. Le problème le plus difficile à résoudre serait de fournir des moyens de subsistance aux habitants des régions submergées.

Il n'en demeure pas moins que l'approvisionnement en énergie du pays a été assuré jusqu'à présent par l'exploitation combinée de ses ressources hydrauliques et thermiques. Toutefois, il est un facteur qu'il ne faut pas oublier : plus nous posséderons de centrales hydrauliques du type « au fil de l'eau », plus nous aurons besoin de centrales thermiques de complément; aussi les coûts de production de l'énergie ne feront-ils qu'augmenter.

Il est normal, de nos jours, que les centrales hydrauliques soient exploitées pendant environ 5 600 heures par an en moyenne. S'il fallait diminuer ce nombre d'heures, et à moins qu'il ne devienne possible de construire des barrages de retenue assez vastes pour compenser les variations saisonnières, il serait nécessaire d'augmenter le nombre des centrales thermiques complémentaires.

Le rendement thermique des chaudières des centrales thermiques est actuellement de 19 pour cent en moyenne, selon les évaluations. Les installations les plus récentes ont un rendement qui dépasse 30 pour cent, et il y a des raisons de croire que ce chiffre pourra bientôt s'élever à 40 pour cent. Mais la puissance de ces installations devient actuellement si forte, et le montant des capitaux nécessaires à leur construction si important, qu'il n'est plus possible de les exploiter à temps partiel, pendant 3 000 heures par an, par exemple, comme les circonstances l'imposent. Il s'ensuit que si l'on continuait à construire de nouvelles centrales hydrauliques, il serait indispensable d'accroître encore le nombre des centrales complémentaires pour parer aux inégalités de l'exploitation hydraulique, ce qui ne ferait que désorganiser la demande en charbon, et rendrait inévitable l'adoption de mesures visant à compléter l'approvisionnement en énergie pendant les années de sécheresse.

Il existe au Japon de nombreuses centrales hydrauliques pourvues de petits bassins régulateurs, dont

le fonctionnement est souvent entravé par l'envasement. Ceci rendrait plus nécessaire encore la construction de nouvelles centrales thermiques de complément. En résumé, les observations récentes dont nous avons rendu compte, et qui valent aussi bien pour les centrales thermiques que pour les centrales hydrauliques, montrent que des mesures particulières sont nécessaires si l'on veut que l'exploitation combinée des unes et des autres fournisse un rendement satisfaisant.

Il y a lieu aussi de mentionner un principe nouveau, dont les applications commencent à se répandre, et qui a des conséquences importantes : c'est l'équipement *à fins multiples* des ressources hydrauliques. Ce principe assure excellemment une meilleure utilisation des ressources hydrauliques affectées à diverses fins, peu compatibles entre elles, et permet en même temps de faire face à la demande en énergie.

Il faut donc choisir avec un soin particulier le mode d'utilisation combiné des deux formes d'énergie. Le Japon dispose encore d'un important potentiel hydraulique inexploité, mais rien ne permet d'affirmer que ces ressources pourront un jour être intégralement mises en valeur. Le problème le plus grave consiste à stabiliser la production respective d'énergie thermique et d'énergie hydraulique de manière à satisfaire la demande, en qualité et en quantité, c'est-à-dire en fournissant régulièrement au consommateur l'énergie requise, au prix le plus bas possible.

CONCLUSION

En évaluant le rapport futur entre la demande et l'offre d'énergie tirée de diverses sources, nous avons soulevé, on l'a vu, de nombreux problèmes. On peut cependant ne voir là qu'une conséquence inévitable du développement économique graduel du pays. Ces problèmes à leur tour demandent de multiples et sérieuses réflexions. Ils posent notamment la question d'une refonte de la structure industrielle, qui devrait permettre de formuler une politique à longue échéance de l'énergie.

En de telles circonstances, il est très difficile de prédire à coup sûr ce que sera à l'avenir le rapport entre la demande et l'offre d'énergie. Du moins peut-on dire qu'en l'absence de mesures appropriées, le prix de vente réel de l'énergie aura plutôt tendance à augmenter qu'à baisser. Quoi qu'il en soit, nous ne pouvons négliger l'éventualité d'un grave déséquilibre entre l'offre et la demande, qui pourrait se produire même avant 1975 et modifierait ainsi profondément la base de nos calculs.

Nous pouvons conclure de l'exposé qui précède qu'il importe de ne rien négliger pour disposer de sources d'énergie plus nombreuses et améliorer le rendement des diverses formes d'utilisation.

Le rendement thermique moyen de l'énergie employée à divers usages est un peu plus faible au Japon que dans d'autres pays industrialisés, comme l'a montré par exemple M. Palmer C. Putnam dans son livre intitulé : *Energy in the Future* (Van Nostrand & Co., éditeur, New York, 1953). Nous admettons effectivement que certains progrès peuvent encore être réalisés dans l'organisation de la consommation d'énergie.

A cet égard, nous devons nous efforcer d'utiliser au maximum les compétences individuelles, non seulement pour augmenter la production d'énergie, mais aussi et surtout, pour rationaliser ses diverses applications. C'est sans doute la meilleure façon d'aborder le problème de l'énergie que de s'y attaquer ainsi des deux côtés à la fois. Il semble que la structure actuelle de l'industrie doive nécessairement se modifier tôt ou tard pour s'adapter à la structure probable de la production future de l'énergie.

Enfin, nous nous efforcerons de nous assurer des ressources énergétiques plus importantes, qu'elles soient d'origine classique ou qu'elles résultent de nouvelles découvertes, qu'elles soient indigènes ou importées. Nous portons un très vif intérêt à l'exploitation expérimentale de l'énergie géothermique, éolienne, solaire, et nous attendons beaucoup du rôle que pourra jouer dans l'avenir l'énergie atomique appliquée à l'industrie.

Besoins et ressources de la République Argentine en énergie électrique et thermique

par G. Mendivelzúa *

Dans le présent mémoire, nous commencerons par une étude géographique qui nous permettra de situer les régions de grand peuplement, les centres de production et de consommation d'énergie, et nous aidera à éclaircir certaines questions relatives aux besoins en énergie qui se manifesteront dans l'avenir, ainsi qu'aux différents moyens d'y subvenir.

Nous présenterons ensuite une vue d'ensemble de la situation énergétique du pays et, finalement, une estimation des besoins futurs en 1980, afin d'essayer de déterminer la forme et le volume que pourrait prendre l'apport de l'énergie nucléaire.

GÉOGRAPHIE DU PAYS

Le territoire de la République Argentine, dans sa partie continentale, a la forme d'un triangle renversé, qui s'étend approximativement entre les parallèles de 21 degrés 47 minutes et de 55 degrés 20 minutes de latitude sud, et les méridiens de 53 degrés 45 minutes et de 73 degrés 25 minutes de longitude ouest de Greenwich.

La République Argentine comprend en outre les archipels des Malouines, de la Géorgie du Sud, des Sandwich du Sud et des Orcades du Sud, ainsi que le secteur antarctique argentin, qui s'étend entre les méridiens de 25 degrés et de 74 degrés de longitude ouest et entre le parallèle de 60 degrés de latitude sud et le Pôle Sud.

La superficie de la partie continentale du territoire est de 2 778 412 km², celle des archipels de 17 283 km² et celle du secteur antarctique de 1 230 000 km², ce qui donne une superficie totale de 4 025 695 km².

On peut distinguer dans le territoire argentin deux unités géomorphologiques principales : *a*) la région montagneuse de l'Ouest; et *b*) les plaines de l'Est.

D'une façon générale, les montagnes les plus élevées se trouvent dans les régions continentales du territoire, tandis que les plaines, qui en constituent la plus grande partie, s'étendent à l'Est.

Divers systèmes orographiques moins importants, tels que les chaînes de la Pampa et celles de Tandil, s'élèvent au milieu de la plaine, mais ils ne sont pas très élevés.

Les plaines s'étendent du niveau de la mer, à l'est, au pied de la cordillère occidentale, à environ 1 000 mètres d'altitude. On peut y distinguer plusieurs subdivisions : la région des pampas, celle des plateaux patagoniques, celle des hauts plateaux, (région de la « puna »), etc.

A son tour, la zone montagneuse de l'ouest se divise en : cordillère septentrionale, cordillère australe, précordillère, chaînes subandines, etc.

Les plus grandes altitudes se trouvent dans la cordillère de Mendoza, San Juan, où elles dépassent souvent 6 000 mètres. Le pic le plus élevé est l'Aconcagua, qui culmine à 7 031 mètres.

Le littoral argentin est très étendu, puisqu'il va de la Terre de Feu à l'embouchure du fleuve Paraná Guazú, dans le Rio de la Plata, et que sa longueur atteint 5 117 kilomètres. Il faut encore signaler l'étendue du plateau sous-marin qui a plus de 400 kilomètres de large entre le sud de la province de Buenos Aires et le territoire de Santa Cruz et dépasse 800 kilomètres à 52 degrés de latitude sud où il englobe l'archipel des Malouines.

De façon générale, on distingue, dans la République Argentine, deux grands systèmes hydrographiques. L'un d'eux comprend les grands fleuves Paraná et Uruguay et leurs innombrables affluents dont la réunion forme le Rio de la Plata. Ce système, qui prend naissance dans le Matto Grosso, a une direction générale nord-sud.

L'autre système englobe tous les fleuves qui prennent leur source sur le versant oriental de la cordillère des Andes et qui se dirigent vers l'est en traversant la région plane du pays; ceux des latitudes élevées et moyennes se jettent dans l'Atlantique, tandis que ceux des latitudes plus basses forment en général des bassins fermés.

CENTRES DE POPULATION ET SOURCES D'ÉNERGIE

D'après les statistiques de 1953, la population du pays était de 18 220 848 habitants; elle dépasse

---

Original : espagnol.

* Commission nationale de l'énergie atomique, Argentine.

actuellement les 19 millions d'habitants. Cela représente une densité de 4,5 habitants par km² si l'on prend la superficie totale et 6,5 habitants par km² si l'on ne tient compte que de la superficie du territoire continental.

La population est répartie de façon très inégale avec de grandes concentrations dans certaines régions; 55,6 pour cent de la population se trouvent dans la capitale fédérale et les provinces de Buenos Aires et de Santa Fé, sur une superficie qui représente 16 pour cent seulement du territoire continental de la République.

C'est dans ces régions de grand peuplement que se consomment 80 pour cent de l'électricité, presque entièrement d'origine thermique, et une proportion analogue des combustibles utilisés. D'autre part, les sources d'énergie et de combustibles utilisables ou disponibles se trouvent dans des régions très éloignées de ces centres de consommation.

Si les centres de production sont ainsi éloignés des centres de consommation, c'est, entre autres causes, parce que les industries se sont installées en tenant compte principalement de la proximité des centres de consommation de leurs produits et des marchés de matières premières, et qu'il n'existe pas encore d'industries métallurgiques ou électrochimiques suffisamment développées pour lesquelles le coût de l'énergie justifierait l'installation à proximité des sources d'énergie.

Voyons quelles sont actuellement les communications entre les centres de production et les centres de consommation :

1. La principale ressource en énergie, le pétrole, est concentrée dans quatre zones : *a*) Comodoro Rivadavia, à 1 500 km de Buenos Aires, par voie maritime; *b*) Campo Durán, à 1 900 km de Buenos Aires; *c*) Mendoza, à plus de 1 000 km; *d*) Neuquén, à plus de 1 000 km.

2. Les centrales hydrauliques en exploitation (dont la puissance atteindra 500 000 kW en 1957) se trouvent dans des régions de consommation réduite; une fois satisfaits les besoins de ces régions, il faut transporter l'excédent vers les régions éloignées de plus grande consommation. Le potentiel hydroélectrique économiquement utilisable dans l'état actuel de la technique représente une puissance d'environ 7 millions de kW, mais il se trouve à une distance de 500 à 1 000 km des centres qui en auraient l'emploi.

3. Le principal gisement charbonnier argentin se trouve dans la région du Rio Turbio; on compte en extraire 1 million de tonnes par an. Le transport jusqu'à Buenos Aires représente 250 km par chemin de fer et 2 000 par voie maritime. Les autres zones carbonifères de quelque intérêt sont celles du Rio Negro et de La Rioja, à plus de 1 000 km de la capitale.

4. Les combustibles d'origine végétale sont un peu plus répandus et plus rapprochés de certains centres de consommation mais leur transport pose aussi de graves problèmes.

Quoique très riche, en puissance, pour ce qui est des combustibles et des sources d'énergie classiques, le pays se voit actuellement obligé de consacrer une grande partie de son potentiel économique à l'importation de combustibles.

État actuel des besoins et des ressources en énergie

En ce qui concerne l'énergie, la politique argentine tend à équilibrer le plus rapidement possible les besoins nationaux et la production intérieure. Les quantités d'énergie actuellement produites ne suffisent pas au développement du pays. D'autre part l'accroissement de la population promet d'être très rapide et l'on prévoit pour 1980 un chiffre de 31 millions d'habitants.

L'augmentation de l'activité industrielle du pays, pour la période 1937-1951, a été de 73 pour cent; c'est le taux le plus élevé enregistré par les statistiques des Nations Unies. En outre, nous souffrons actuellement d'une pénurie d'énergie, particulièrement de courant électrique, la puissance minimum nécessaire au pays étant de plus d'un million de kW.

En donnant ici une vue d'ensemble de l'état actuel des différentes sources d'énergie dans le pays et des prévisions que l'on peut faire à leur sujet pour l'avenir, nous allons chercher à déterminer la forme et le volume que pourrait prendre l'apport de l'énergie d'origine nucléaire.

De 1938 à 1952, la consommation totale d'énergie de toutes origines, évaluée en calories et convertie en tonnes de pétrole, a été la suivante :

Années	*Équivalent de la consommation annuelle en millions de tonnes de pétrole*
1938	10,07
1939	9,65
1940	9,70
1941	10,58
1942	10,99
1943	11,82
1944	12,47
1945	10,81
1946	11,70
1947	12,54
1948	13,51
1949	13,36
1950	14,20
1951	15,40
1952	15,60
1953	16,10

L'augmentation annuelle provient presque exclusivement des combustibles, l'énergie hydraulique représentant au maximum 450 000 tonnes de pétrole.

Le tableau ci-dessous indique la part des différentes sources d'énergie dans la consommation

nationale. Les pourcentages sont calculés d'après l'équivalence en calories :

Consommation	*1939*	*1945*	*1949*	*1950*	*1951*	*1952*	*1953*
Coke	20,5	6,5	10,8	7,6	10,4	8,3	7,6
Pétrole et dérivés	42,5	29,7	57,7	62,5	62,6	65,0	62,5
Bois et charbon de bois	17,0	37,3	16,4	14,5	12,1	11,5	14,5
Résidus	8,3	15,4	5,2	4,9	4,4	4,4	4,9
Gaz naturel et gaz industriel	6,5	5,0	5,4	6,9	6,9	7,3	6,9
Énergie hydraulique	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5
Divers et pertes	4,9	5,7	4,1	3,2	3,2	3,0	3,7

En moins de vingt ans, la consommation d'énergie dans le pays a presque doublé, et, si l'on fait abstraction de la période de guerre au cours de laquelle nous avons été obligés, pendant un certain temps, de nous contenter de nos propres ressources — nous y reviendrons plus loin — on constate que le développement remarquable de l'industrie a rendu le problème plus aigu, la situation étant à nouveau telle que, malgré ses ressources naturelles, le pays, est obligé d'importer 50 pour cent de ses combustibles, ce qui représente une dépense d'environ 200 millions de dollars par an. Ce chiffre prend toute son importance quand on l'insère dans l'ensemble des importations et des exportations du pays, comme on peut le faire en consultant les tableaux suivants :

Années	*Total des importations*		*Importations de combustibles*		*Pourcentage*
	Pesos (En millions)	*Dollars*	*Pesos* (En millions)	*Dollars*	
1951	7 209	1 448	1 095	219	15,1
1952	5 979	1 196	1 268	254	21,2
1953	4 308	862	987	197	22,9

Années	*Total des exportations*		*Importations de combustibles*		*Pourcentage*
	Pesos (En millions)	*Dollars*	*Pesos* (En millions)	*Dollars*	
1951	5 890	1 178	1 095	219	18,6
1952	3 547	709	1 268	254	35,8
1953	5 739	1 148	987	197	17,2

Pour les combustibles, le change est calculé au taux préférentiel de 5 pesos pour 1 dollar.

En volume, les combustibles représentent de 65 à 80 pour cent de l'ensemble du tonnage maritime utilisé pour les importations.

Années	*Total des importations* (En milliers de tonnes)	*Combustibles et lubrifiants*	*Pourcentage*
1951	12 052,1	7 945,3	65,9
1952	11 094,5	8 061,2	72,7
1953	9 058,0	7 274,0	80,3

Considérons maintenant la situation actuelle pour chacun des combustibles du pays. Nous étudierons séparément :

a) le pétrole,
b) le gaz,
c) les combustibles d'origine végétale,
d) l'énergie électrique.

Comme nous l'avons vu, c'est le pétrole qui constitue la principale source d'énergie dans le pays. Bien que nous possédions des réserves pétrolifères, des installations d'extraction, des distilleries et des moyens de transport pour le produit et ses dérivés, la consommation dépasse la production. Selon les statistiques internationales, la production argentine en 1952 a été de 3 600 000 tonnes, venant ainsi au 11e rang avec 0,6 pour cent de la production mondiale, comme l'indique le tableau suivant :

Pays	*Milliers de tonnes*	*Pourcentage du total*
1. États-Unis d'Amérique	313 836,0	55,6
2. Venezuela	94 620,0	16,8
3. Arabie saoudite	40 704,0	7,2
4. Koweit	37 632,0	6,7
5. Irak	17 616,0	3,1
6. Mexique	11 052,0	2,0
7. Indonésie	8 520,0	1,5
8. Canada	7 872,0	1,4
9. Colombie	5 448,0	1,0
10. Bornéo	5 076,0	0,9
11. ARGENTINE	3 588,0	0,6
12. Katar	3 300,0	0,6
13. Trinité	3 084,0	0,6
14. Égypte	2 352,0	0,4
15. Pérou	2 184,0	0,4
16. Allemagne occidentale	1 752,0	0,3
17. Bahrein	1 512,0	0,3
18. Iran	1 344,0	0,2
19. Pays-Bas	715,2	0,1
20. Équateur	374,4	0,1
21. France	349,2	0,1
22. Japon	306,0	0,1
23. Pakistan	178,8	—
24. Yougoslavie	152,4	—
25. Chili	115,7	—
26. Maroc français	101,0	—
27. Brésil	98,0	—
28. Bolivie	68,4	—
29. Italie	63,5	—
30. Sarawak	52,0	—
31. Algérie	46,3	—
32. Turquie	21,7	—
TOTAUX	564 134,6	100,0

Notre production de pétrole et de dérivés du pétrole n'étant pas suffisante, nous devons recourir à l'importation comme nous l'avons déjà dit. On trouvera ci-après un tableau indiquant, en mètres cubes, les quantités de pétrole brut de différentes provenances acheté ces dernières années.

Pays	*1950*	*1951*	*1952*	*Pourcentage, pour chaque pays, du total des trois années*
Arabie Saoudite	16 832	153 945	212 736	3,53
Bolivie	8 616	13 309	10 111	0,30
Équateur	56 538	—	20 555	0,72
Iran	1 825 592	927 430	—	25,35
Pérou	226 580	249 798	144 532	5,73
Venezuela	1 001 098	1 170 584	1 726 622	35,9
Koweït	—	299 214	1 321 377	14,93
Colombie	—	18 973	139 701	1,46
États-Unis d'Amérique	196 260	247 403	249 751	6,38
Bornéo britannique	227 923	351 798	39 849	5,7
TOTAUX	3 559 439	3 432 454	3 865 234	100,00

Nous importons également de l'essence et divers sous-produits, comme l'indique le tableau suivant :

Années	*Essence* (m³)	*Pétrole lampant* (m³)	*Gas-oil* (tonnes)	*Huile diesel* (tonnes)	*Fuel-oil* (tonnes)	*Huiles lubrifiantes* (tonnes)
1947	167 798	14 392	6 076	65 447	2 430 246	13 468
1948	306 547	56 591	14 162	75 456	2 624 455	30 707
1949	233 012	7 101	24 306	94 288	2 457 958	27 232
1950	121 812	20 664	13 030	51 193	2 387 196	45 614
1951	48 930	12 030	33 413	46 365	2 628 049	42 297
1952	55 519	43 650	71 553	102 687	2 774 442	69 770
1953	61 605	—	77 748	144 212	2 089 606	52 883

De 1937 à 1953, les fluctuations de la production et des importations de combustibles liquides (équivalent de pétrole) ont été les suivantes :

Années	*Production* — *Fluctuation par rapport à l'année précédente*	*Production* — *Fluctuation par rapport à 1937*	*Importations* — *Fluctuation par rapport à l'année précédente*	*Importations* — *Fluctuation par rapport à 1937*
1938	4,4	4,4	35,9	35,9
1939	9,0	13,8	— 4,8	29,4
1940	10,7	26,0	— 3,1	25,4
1941	6,8	34,6	— 4,0	20,4
1942	7,7	44,9	— 48,7	— 38,3
1943	4,8	51,9	— 56,7	— 73,3
1944	— 2,4	48,2	— 27,0	— 80,5
1945	— 5,6	39,9	83,4	— 64,2
1946	— 9,1	27,2	481,1	107,8
1947	5,0	33,6	17,1	143,4
1948	6,3	42,0	25,4	205,1
1949	— 2,7	38,1	— 2,0	199,2
1950	3,9	43,5	13,1	238,4
1951	4,3	49,6	11,1	275,9
1952	1,5	51,8	11,4	318,7
1953	14,9	74,3	— 10,4	290,1

On voit que la production n'a augmenté qu'au cours de ces dernières années, et que l'on a dû intensifier les importations à un rythme bien plus rapide.

En résumé, nous produisons 0,6 pour cent du pétrole du monde, mais notre consommation est 2,5 fois plus élevée que la production nationale.

Nous savons d'autre part que les réserves de pétrole de la République argentine sont très importantes. Il serait donc possible d'en intensifier l'exploitation; le Gouvernement s'est résolument orienté dans ce sens et le deuxième Plan quinquennal a fixé comme objectif pour 1957 l'extraction de 6 millions de tonnes de pétrole.

Pour accroître la production, il est indispensable d'intensifier la prospection et surtout d'augmenter les moyens de forage, de stockage et de transport du pétrole. On s'y emploie activement à l'heure actuelle et des accords ont été récemment conclus avec des compagnies qui se chargeront de l'extraction. On s'efforce également d'augmenter la capacité des raffineries (on en compte actuellement 23) et de construire des pipe-lines et de nouveaux entrepôts.

Afin de mener à bien ces projets, un investissement de 2 600 000 millions de pesos a été prévu dans le deuxième Plan quinquennal.

Gaz

Actuellement le gaz n'est employé dans le pays qu'à des usages domestiques; on ne l'utilise ni comme combustible industriel, ni à des fins chimiques. L'Argentine produit du gaz naturel et du gaz industriel et possède d'énormes réserves de gaz naturel. La production de gaz naturel en 1952, comparée avec celle d'autres pays, est indiquée par le tableau suivant :

Pays	*Millions de m³*
États-Unis d'Amérique	133 092,0
Venezuela	20 880,0
Canada	2 712,0
Mexique	2 649,6
Italie	1 435,2
Bornéo	1 094,4
Indonésie	1 069,2
ARGENTINE	898,1
Trinité	891,6
France	276,0
Japon	91,1
Autriche	48,8
Yougoslavie	13,8

Pour cette même année 1952, la production de gaz industriel comparée à celle d'autres pays, a été la suivante :

Pays	*Millions de m³*
Royaume Uni	16 140,0
États-Unis d'Amérique	13 620,0
Allemagne occidentale	12 096,0
Belgique	1 776,0
Pays-Bas	1 752,0
Japon	1 617,6
Australie	1 138,8
Canada	745,2
Danemark	417,6
Autriche	297,6
ARGENTINE	295,2
Espagne	292,8
France	248,4
Brésil	240,0
Italie	202,8
Irlande	166,8
Sarre	154,8
Nouvelle-Zélande	150,0
Chili	148,8
Algérie	80,5
Norvège	50,5
Portugal	48,4
Trieste	46,1
Finlande	38,6
Yougoslavie	23,6
Panama	20,5
Luxembourg	18,5
Hong-Kong	16,2
Malaisie	13,4
Tunisie	12,7
Ceylan	9,2

La consommation de gaz a augmenté rapidement et va croissant; elle double tous les cinq ans. Elle est principalement due à la construction de canalisations dont la longueur totale atteignait 4 500 km en mars 1954 qui permettent d'approvisionner 700 000 consommateurs. L'Argentine se place ainsi, par l'étendue de son réseau de canalisations, au troisième rang des nations du monde après les États-Unis d'Amérique et l'Union soviétique.

Les travaux que prévoit le deuxième Plan quinquennal pour augmenter la capacité des principales canalisations ont été entrepris; d'autres canalisations sont en construction qui totaliseront environ 2 500 km. L'une d'elles aura une longueur de 1 700 km et un débit de 7 millions de m³ par jour.

Charbon

La demande mondiale d'énergie est depuis longtemps couverte par les divers combustibles et dans des proportions qui n'ont guère varié au cours des cinquante dernières années; les chiffres pour 1953 figurent dans la première colonne du tableau que nous donnons ci-dessous. Toutefois, en ce qui concerne notre pays, la situation est éloignée de cette moyenne (voir la colonne 2). Les pourcentages ont été calculés d'après l'équivalent en calories :

Sources d'énergie	*Pourcentage moyen mondial*	*Pourcentage pour la République Argentine*
Charbon	45	8
Pétrole	40	63,5
Bois	2	15,5
Énergie hydraulique	3	0,4
Gaz naturel	10	6,9
Résidus	—	5,7

Ces données correspondent pour l'Argentine à des époques normales; pendant la guerre ces pourcentages ont subi de fortes variations car il était difficile d'importer des combustibles. On peut se faire une idée de ces variations en comparant, par exemple, les années 1939 et 1944 :

Combustibles	*1939 (pour cent)*	*1944 (pour cent)*	*Variations*
Pétrole	44,0	32,6	— 11,4
Charbon et coke	22,0	4,0	— 18,0
Bois à brûler	18,1	38,0	19,9
Résidus et céréales	9,0	19,0	10,0
Gaz	6,5	6,0	— 0,5
Énergie hydraulique	0,4	0,4	—
TOTAUX	100,0	100,0	

Jusqu'à présent, l'apport des charbonnages indigènes a été très faible. En 1952, sur un total mondial (sans compter l'Union soviétique) de 1 189 millions de tonnes, l'Argentine n'a produit que 112 000 tonnes.

On trouvera dans le tableau suivant le volume et la valeur en pesos des importations de charbon de l'Argentine :

Années	*Nombre de tonnes importées*	*Valeur (En milliers de pesos)*	*Moyenne par tonne*
1938	2 859 678	—	—
1939	2 924 805	—	—
1940	2 022 663	—	—
1941	1 012 369	25 769,0	25,45
1942	518 697	33 057,0	63,73
1943	575 621	42 874,0	74,48
1944	618 818	45 943,0	74,24
1945	767 872	55 087,0	71,74
1946	1 144 368	79 497,0	69,47
1947	1 214 610	98 643,0	81,21
1948	2 177 208	164 693,0	75,64
1949	1 380 212	103 687,0	77,33
1950	1 467 301	102 927,0	71,13
1951	2 218 638	328 922,0	151,74
1952	1 783 826	252 188,0	141,37
1953	1 228 207	129 493,1	105,44

De même que pour les autres importations, on peut observer une diminution marquée pendant les années de guerre; pour la provenance du charbon importé, le tableau suivant suffira :

Pays	*1949*	*1950*	*1951*	*1952*	*1953*	*% pour chaque pays sur 5 ans*
Chili	72 055	73 850	56 354			2,5
États-Unis d'Amérique	35 217	44 228	1 287 835	1 174 928	513 601	37,8
Pérou	9 000	67 553	43 465	39 028	38 400	2,5
Union Sud-Africaine . .	228 808	117 486	41 801	13 454	6 943	5,1
Grande-Bretagne . . .	1 004 451	1 010 866	442 019	413 611	515 719	41,9
Pologne	—	109 952	135 852	119 305	149 995	6,4
Pays-Bas	26 998	7 036	40 844	5 000	3 549	1,0
Belgique	1 847	1 000	6 000	—	—	0,1
Autres pays	1 836	35 330	164 468	18 500	—	2,7
TOTAUX	1 380 212	1 467 301	2 218 638	1 783 826	1 228 207	100,0

La consommation de charbon se répartit de la façon suivante :

Consommateurs	*1949*	*1950*	*1951*	*1952*	*1953*	*Moyenne des 5 ans*
			(en pourcentage)			
Chemins de fer	43,8	38,8	47,9	57,9	54,5	48,5
Entreprises de navigation	2,1	1,3	2,4	1,8	1,3	1,8
Centrales thermiques .	36,0	35,9	33,9	27,7	30,0	32,8
Frigorifiques	3,2	0,8	0,4	0,6	0,7	1,2
Gaz de l'État (ENDE)	3,4	2,7	2,6	1,0	1,1	2,2
Fabriques de ciment .	0,9	0,7	0,8	1,1	1,5	0,9
Autres consommateurs	10,6	19,8	12,0	10,0	10,9	12,6
TOTAUX	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Ce n'est que récemment, grâce à la découverte d'importants gisements et aux plans établis pour leur exploitation, que les perspectives sont changées; on compte extraire 1 million de tonnes de charbon par an, au cours des cinq ans à venir, et doubler ce chiffre par la suite.

Combustibles d'origine végétale

Nous avons déjà vu que la consommation de bois et de résidus d'origine végétale représente un pourcentage important du total des combustibles consommés dans le pays. La seconde guerre mondiale, en réduisant sérieusement les possibilités d'importation de charbon et de combustibles liquides, a posé à l'Argentine, un grave problème d'énergie.

Ce problème a été presque entièrement résolu par l'utilisation de combustibles d'origine végétale; on a eu recours non seulement aux résidus qui se brûlent normalement, mais on a aussi brûlé une grande partie des récoltes (en particulier le lin et le maïs qu'il était impossible d'exporter). D'autre part, le bois de chauffage a été employé en si grandes quantités que le pays a perdu près de 1 million d'hectares de forêts.

Les deux tiers des 120 milliards de calories consommées de 1943 à 1945 ont été fournis par des combustibles d'origine végétale. Voici un tableau de la consommation en 1941; il est à noter qu'à l'exception de la part des céréales, la consommation est sensiblement la même ces dernières années :

Combustibles	*Tonnes*
Épis de maïs égréné	2 500 000
Bagasse de canne à sucre	1 410 000
Maïs	800 000
Sciure de quebracho	390 000
Marc de raisin	250 000
Écorces de graines oléagineuses	130 000
Balles de riz	20 000

Nous parlerons du bois dans un paragraphe distinct, mais, afin de compléter le tableau des combustibles d'origine végétale, nous ajouterons ici que le pays produit, à partir du maïs et de la mélasse de canne à sucre, 100 millions de litres d'alcool éthylique destinés à servir de combustible.

Même en temps normal, la consommation de bois est très importante. La consommation moyenne par habitant et par an, qui atteint dans le monde 430 kg, est chez nous de 800 kg. On emploie normalement environ 15 millions de tonnes de bois par an dont près de 13 millions sont directement utilisées comme combustible ou pour la fabrication de charbon de bois. Les chiffres de la consommation pour les années 1938 à 1953 sont données ci-après.

Années	Tonnes de bois employées pour la fabrication de charbon de bois	Tonnes de bois utilisées comme combustible
1938	5 256 804	8 336 238
1939	4 692 541	7 744 047
1940	4 853 030	8 505 611
1941	5 337 388	10 198 207
1942	5 705 000	13 249 350
1943	6 309 779	15 091 039
1944	5 976 691	14 863 564
1945	5 809 041	14 248 398
1946	5 547 955	12 839 393
1947	5 123 307	10 750 820
1948	4 444 867	9 265 255
1949	5 826 492	10 322 532
1950	4 658 815	9 107 162
1951	4 122 846	8 369 871
1952	4 705 176	9 255 400
1953	4 536 280	8 873 768

Les plans visant à accroître et à rationaliser l'usage du bois sont très vastes et le but principal de l'action entreprise est d'amener le pays à se suffire; on s'efforcera en même temps d'assurer la stabilité de l'évolution d'une solide économie forestière (chapitre XI du deuxième plan quinquennal).

A cet effet, on intensifiera l'étude des forêts du pays et leur exploitation rationnelle (58 millions d'hectares actuellement); on procédera en outre au boisement de 700 000 hectares et à l'organisation de la production de charbon de bois qui, à l'heure actuelle, n'est pas suffisamment avancée du point de vue technique pour atteindre un bon rendement.

Énergie électrique

La République Argentine ne se classe pas parmi les grands pays producteurs et consommateurs d'énergie électrique. Bien que les chiffres atteints soient satisfaisants si on les compare avec ceux d'autres pays dont la structure économique correspond à la sienne, il faudra s'efforcer par tous les moyens d'augmenter considérablement la production, étant donné l'augmentation rapide de sa population et son développement industriel.

La situation actuelle est illustrée par le tableau suivant :

Pays	Production en millions de kWh (1952)	Consommation par habitant (non compris l'énergie produite et consommée par certaines industries)
États-Unis	456 000,0	2 543,2
Union soviétique	120 000,0	—
Royaume-Uni	61 992,0	1 229,3
Canada	61 788,0	4 281,9
Allemagne occidentale	56 208,0	—
Japon	44 016,0	514,8
France	38 460,0	902,8
Italie[a]	30 840,0	—
Suède[a]	20 700,0	—
Norvège[a]	18 408,0	—
Union Sud-Africaine[a]	12 540,0	—
Australie	11 304,0	—
Suisse	10 848,0	2 253,0
Belgique[a]	9 468,0	—
Pays-Bas	6 312,0	608,3
Autriche	6 264,0	901,4
Inde	6 204,0	16,9
Mexique[a]	5 328,0	—
ARGENTINE	4 704,0	260,5
Finlande[a]	4 500,0	—
Nouvelle-Zélande	3 612,0	1 810,5
Brésil	3 084,0	56,6
Yougoslavie[a]	2 664,0	—
Danemark	2 328,0	537,1
Chili	1 872,0	315,6
Sarre[a]	1 824,0	—
Portugal[a]	1 333,2	—
Irlande	1 134,0	384,7
Turquie[a]	1 065,6	—
Malaisie[a]	961,2	—
Cuba	918,0	154,9
Colombie	841,2	71,5
Luxembourg[a]	831,6	—
Porto Rico	728,4	329,0
Venezuela	722,4	136,8
Algérie	704,4	77,1
Maroc français	685,2	—
Israël	668,4	467,4
Corée du Sud	633,6	32,6
Philippines	558,0	27,0
Hong-Kong	391,2	173,9
Pakistan[a]	300,0	—
Indochine[a]	248,4	—
Tunisie	163,2	—
Kenya et Ouganda	145,8	—
Ceylan	118,6	14,9
Syrie	98,8	29,2
Panama	93,6	111,3
Guatemala	84,7	29,3
Trinité	71,3	—
Tanganyika	64,3	8,1
Thaïlande	63,2	3,3
Côte-de-l'Or	36,8	9,2

[a] Y compris l'énergie produite et consommée par certaines industries.

Il existe de nombreuses études où l'on trouve un exposé détaillé des divers aspects de la production d'énergie électrique et qui fournissent une abondante documentation statistique; nous nous bornerons ici à rappeler brièvement quelques points essentiels. (Pour de plus amples détails, voir la bibliographie, *in fine*.)

Production et consommation. — L'énergie électrique produite en Argentine est surtout d'origine thermique; la consommation totale des installations énergétiques (combustible et énergie électrique) équivaut à 2 millions de tonnes de pétrole par an pour une production moyenne de 4 875 000 000 kWh. Si l'on compare la consommation de calories des installations de production d'énergie électrique au total des calories consommées dans le pays, on constate que 13 pour cent correspondent à la con-

sommation des installations productrices d'électricité. Dans le tableau suivant nous donnons le détail de la consommation de combustibles et d'énergie pour la production d'électricité :

Énergie	*Unité*	*Quantité*	*Équivalent en tonnes de pétrole*	*Pour cent*
Fuel-oil	Tonnes	1 263 357		
		145 544	1 408 901	71,2
Charbon	Tonnes	658 225	495 000	25,0
Bois	Tonnes	31 158	12 600	1,0
Énergie hydraulique	kWh	158×10^6	55 300	2,8
TOTAL			1 971 801	100,0

Quatre-vingt pour cent des usines thermiques emploient des génératrices à vapeur et 20 pour cent des moteurs à combustion interne. Les chiffres présentés jusqu'ici ne comprennent pas l'énergie produite et consommée par certaines industries et dont le total annuel est estimé à 900 000 000 kWh environ. La puissance installée actuellement exploitée dans le pays est de 1 500 000 kW pour les centrales distributrices et de 500 000 kW pour les centrales industrielles dont la production est consommée sur place. Si l'on fait abstraction de ce dernier chiffre, on obtient 79 watts pour la puissance installée par habitant alors que la consommation annuelle est, comme on l'a vu, de 273 kWh par habitant.

Concentration de la consommation et de la production. — Comme nous l'avons dit au début de ce rapport, la répartition de la population et des installations industrielles est très inégale dans notre pays. Le fait apparaît clairement lorsque l'on étudie la production et la consommation d'énergie électrique. On peut constater ainsi que dans la zone est du pays, qui ne représente que 15 pour cent de la superficie du territoire continental de la République, il se produit et se consomme plus de 91 pour cent du total de l'énergie électrique; dans les régions nord et ouest, 8,9 pour cent; et en Patagonie, 0,1 pour cent seulement. La consommation par habitant varie entre 650 kWh dans la zone la plus industrialisée et 25 kWh seulement dans certaines localités.

Répartition de la consommation. — De l'énergie produite par les centrales distributrices, 48 pour cent sont destinés à l'industrie, 10 pour cent aux transports, 37 pour cent à l'usage commercial et privé, et 5 pour cent à l'éclairage public. Dans la consommation industrielle, la part des industries manufacturières est de 93 pour cent, celle des industries extractives de 7 pour cent. Les industries extractives achètent pratiquement toute l'énergie électrique qu'elles consomment tandis que les industries manufacturières achètent 80 pour cent des quantités dont elles ont besoin et produisent le reste.

Nombre de centrales électriques. — Le tableau suivant indique le nombre et la puissance des centrales distributrices :

Nombre de centrales	*Puissance unitaire*	*Puissance totale*
11	Centrales de plus de 10 000 kW	1 100 000
60	Centrales de 1 001 à 10 000 kW	190 000
176	Centrales de 201 à 1 000 kW	96 000
670	Centrales de moins de 200 kW	60 000
917		1 446 000

L'énergie hydraulique. — La puissance totale correspondant à la réserve d'énergie hydraulique du pays est de l'ordre de 20 millions de kW, mais dans l'état actuel de la technique, la puissance économiquement utilisable est d'environ 7 millions de kW. Seule, une part infime de ce potentiel est employée, atteignant moins de 100 000 kW. La mise en marche, très prochaine, de nouvelles centrales hydrauliques permettra de doubler ce chiffre; le deuxième plan quinquennal prévoit une augmentation de 350 000 kW.

ÉVALUATION DES BESOINS FUTURS EN ÉNERGIE ET POSSIBILITÉS D'Y SUBVENIR

Les données que nous venons de présenter sont tirées de statistiques et d'études émanant de spécialistes ou d'institutions officielles qui se sont occupés indépendamment de divers aspects du problème de l'énergie. Il est évident qu'il conviendrait de rassembler ces travaux et de les coordonner pour rechercher les solutions à apporter au problème. A cette fin, on vient de créer un Conseil national de l'énergie dont les principales fonctions seront, d'après le décret qui l'a institué :

1. L'étude, l'évaluation et l'utilisation rationnelle des sources d'énergie et des ressources hydrauliques;

2. La planification et l'organisation de la production et du marché de l'énergie;

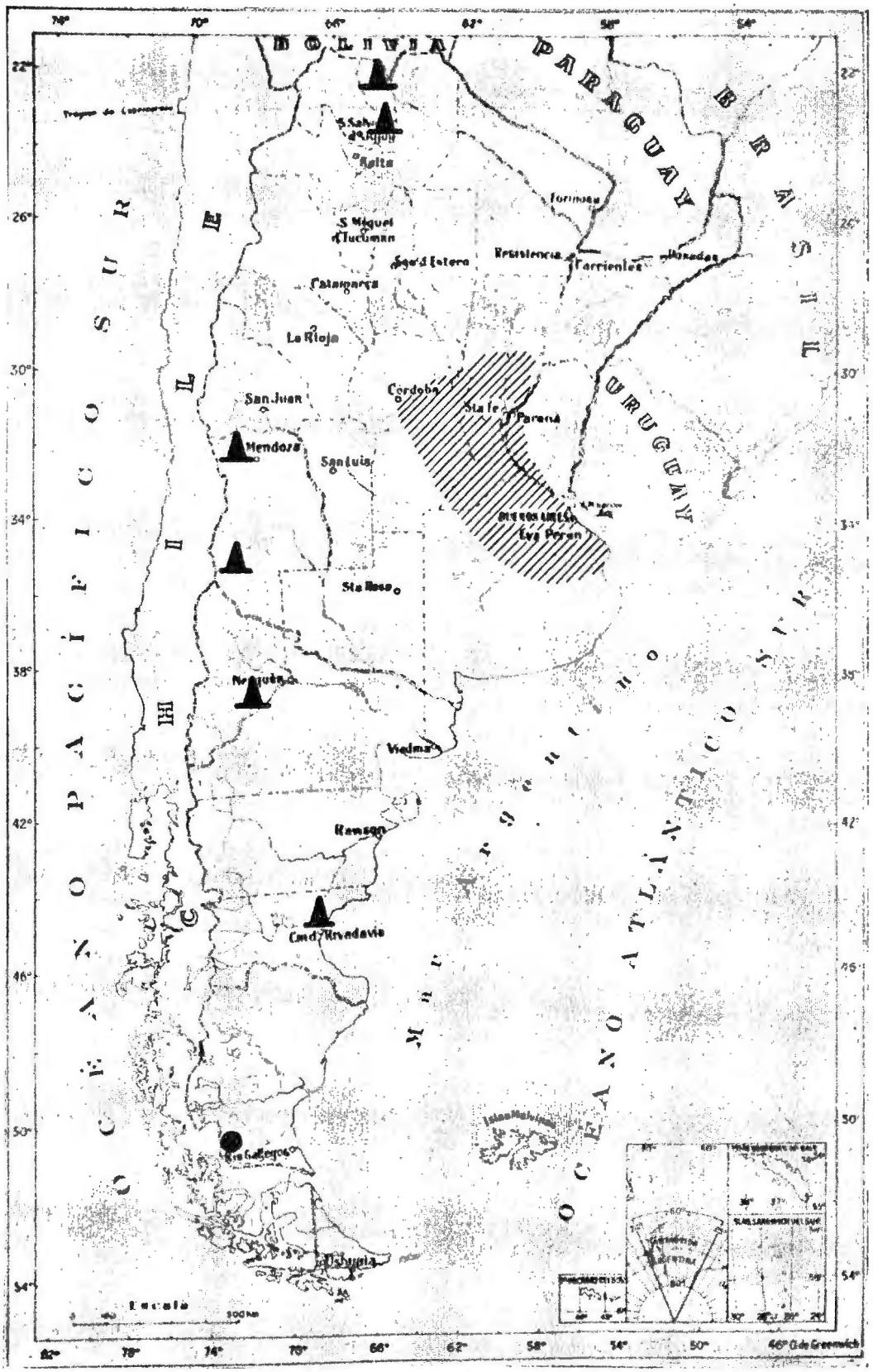
3. L'élaboration de prévisions des besoins annuels du pays en calories et l'étude des moyens rationnels d'y pourvoir;

4. La détermination des importations et des exportations annuelles de combustibles solides et liquides;

5. La répartition par zones et par étapes des travaux publics se rapportant à la production et à la distribution de l'énergie.

Le Conseil national de l'énergie se compose de représentants de chacune des entreprises nationales de cette branche (Yacimientos Petroliferos Fiscales, Gas del Estado, Agua y Energía Eléctrica, Combustibles Solidos) et il est bon de le signaler, du Directeur national de l'énergie atomique.

Le nouveau Conseil a décidé, comme première mesure, d'effectuer le « Premier recensement énergétique » qui donnera une idée précise et concrète des besoins et des ressources du pays et permettra



▲ Pétrole ● Charbon ▨ 56% de la population et 83% de la consommation d'énergie

998/1

d'établir un plan pour l'avenir. Les données existantes nous autorisent toutefois — dans les limites raisonnables de la prévision — à donner une vue d'ensemble de la question pour un avenir pas trop éloigné, savoir jusqu'à 1980. Pour un pays comme l'Argentine qui se développe rapidement et dont la population s'accroît sans cesse, des prévisions portant sur une période plus longue seraient très incertaines. Durant le laps de temps considéré, la consommation d'énergie augmentera pour deux raisons : *a*) accroissement de la population; *b*) augmentation de la consommation par habitant.

En ce qui concerne le premier point, on a cherché à évaluer l'accroissement démographique en tenant compte de différentes variables, et en particulier des grandes fluctuations que peut subir le mouvement d'immigration; les chiffres les plus vraisemblables seraient de 31 millions d'habitants en 1980 et 45 millions en l'an 2000.

En ce qui concerne le deuxième point nous avons déjà vu que la consommation actuelle est faible et qu'elle aurait été bien supérieure sans les difficultés causées par le manque de machines et de matériel pendant la guerre.

Quant à l'augmentation de la consommation d'énergie, il faut l'envisager sous deux aspects, en tenant compte, d'une part, du développement de l'énergie électrique et, d'autre part, de l'augmentation de la production de combustibles destinés à des fins diverses.

L'objectif fondamental de la nation, en matière de combustibles, sera, comme l'indique le second plan quinquennal, de subvenir elle-même à ses propres besoins dans la mesure où le permettront son expansion économique et les exigences du bien-être de la population et de la sécurité nationale. Le but principal, en ce qui concerne l'énergie électrique, est l'électrification progressive et complète du pays afin d'assurer le bien-être général et surtout le développement des activités économiques.

L'augmentation de la production de combustibles devra non seulement couvrir la consommation croissante, mais aussi permettre de diminuer et, dans la mesure du possible, de supprimer les importations. Le pays possédant des réserves suffisantes pour atteindre ce but, il s'agit d'intensifier la prospection, les études et l'exploitation, d'accroître la capacité de stockage et de transport et de rationaliser la consommation.

Il a été dressé pour le présent et pour l'avenir immédiat un plan dont voici quelques-uns des points principaux :

Pétrole. — La production sera intensifiée, afin d'atteindre 6 millions de tonnes par an dans les cinq premières années à venir et 10 millions à la fin des cinq années suivantes. En même temps on développera les lignes de transport, les pipe-lines et la capacité des raffineries existantes; enfin, on construira de nouvelles raffineries.

Charbon. — La production doit augmenter progressivement pour atteindre 1 million de tonnes par an dans les cinq années à venir et probablement plus du double en 1980. A cette fin, on construit des usines d'épuration et des cokeries, tout en améliorant les moyens de transport terrestres et en envisageant l'acquisition de nouveaux bateaux charbonniers.

Combustibles d'origine végétale. — La création de pépinières est à l'étude et le boisement ou le reboisement d'immenses superficies a été entrepris afin d'approvisionner diverses industries en bois et d'aider le pays à se chauffer. On étudiera aussi les moyens rationnels d'améliorer les rendements dans l'utilisation du bois comme combustible direct. Ces rendements sont actuellement très bas.

Gaz. — Les réserves de gaz naturel connues sont considérables. Les possibilités d'intensifier l'utilisation du gaz naturel et du gaz industriel sont très larges et l'on s'emploie à favoriser cet accroissement de la consommation par l'extension continuelle du réseau de canalisations. La production et la consommation devraient doubler tous les sept ou huit ans, ce qui représenterait en 1980 un volume de l'ordre de 4×10^9 m^3.

Autres sources d'énergie. — Il existe dans le pays de grandes réserves de vapeur endogène. On en intensifie actuellement l'étude, tant du point de vue énergétique que du point de vue de la composition, et l'on croit pouvoir les utiliser complètement dans un bref délai.

Électricité. — Dans cinq ans l'installation de centrales d'une puissance totale de 760 000 kW sera terminée; la part des centrales thermiques sera de 406 000 kW le reste étant représenté par des centrales hydrauliques. On prévoit aussi à titre complémentaire d'installer 2 000 km de lignes de transport et de distribution. Les prévisions des cinq années suivantes s'établissent à 450 000 kW pour les centrales hydrauliques et 800 000 kW pour les centrales thermiques. Ainsi en 1965, en faisant la somme de ces nouvelles installations et des usines déjà installées, on obtiendrait une puissance totale double de la puissance actuelle, c'est-à-dire 4 millions de kW ce qui évidemment serait encore peu.

L'ensemble des données présentées jusqu'ici, permet de se faire une idée du rôle que l'énergie nucléaire pourrait jouer dans le pays. Au cours des vingt-cinq années à venir, l'accroissement de la population et le développement rapide de l'industrie vont augmenter, de façon sensible, les besoins du pays en énergie. Une partie de cette augmentation correspondra à une plus forte demande d'énergie électrique; la consommation par habitant serait alors le triple de la consommation actuelle, ce qui, multiplié par le nombre probable d'habitants à cette date (30 000 000) exigera en 1980 une puissance installée de 10 millions de kW.

Nous disposons à l'heure actuelle de 2 millions de kW. Il resterait donc à installer 6 autres millions

de kW pour atteindre la puissance nécessaire à la fin de la période considérée.

Les combustibles disponibles dans le pays devront être utilisés à d'autres fins qu'à la production d'énergie électrique, c'est-à-dire à couvrir l'augmentation de la consommation, à réduire les importations et à en supprimer la nécessité.

L'exploitation des sources d'énergie hydraulique sera intensifiée, mais s'il ne se forme pas de centres industriels à proximité, l'éloignement des centres de consommation obligera à installer des lignes de transport et de distribution onéreuses.

On pourrait donc en Argentine créer des centrales électronucléaires là où l'accès par lignes de transport et de distribution est difficile ou coûteux, ce qui permettrait le peuplement de zones industrielles qui jusqu'à présent n'ont pu se développer à cause de la pénurie d'énergie. Ce serait le cas, par exemple, pour certaines exploitations minières où l'on pourrait traiter les minéraux sur place, sinon complètement du moins en partie.

Nous ne saurions préciser dès maintenant quel sera le coût de l'énergie électronucléaire en Argentine, mais l'on peut prévoir que cette forme d'énergie pourra entrer en concurrence avec l'énergie actuellement produite par d'autres moyens, étant donné que son coût se trouve majoré par divers facteurs, parmi lesquels il faut citer : les frais de transport des combustibles nationaux, la longueur des lignes électriques, la nécessité d'importer des combustibles. Ce dernier point est très important si l'on tient compte non seulement de la valeur absolue de ces importations, mais des devises étrangères qu'elles requièrent.

Il faut noter ici un autre fait essentiel : l'existence dans le pays des matières fissiles et d'une bonne partie des substances accessoires (uranium, thorium, béryllium, graphite, etc.) qui servent à construire les piles. C'est pour cette raison, jointe aux considérations déjà exposées, qu'un vaste programme a été élaboré pour l'étude et la réalisation d'un réseau de centrales nucléaires. On trouvera dans un autre rapport des détails sur l'état de ces études et projets ainsi qu'une description des exploitations minières, des installations actuelles et futures et des caractéristiques des usines projetées.

Nous donnerons, pour terminer, un tableau qui récapitule la situation énergétique du pays à la fin de 1953 ainsi que les prévisions pour 1980. Afin de permettre une meilleure interprétation, il convient de signaler que la part de l'énergie électrique sera probablement plus grande qu'on ne l'indique ici. A l'appui de cette opinion, on peut rappeler notamment qu'il existe des plans relatifs à l'électrification des chemins de fer (lesquels, actuellement ne consomment guère que du pétrole, du bois ou du charbon), et que ces plans seraient ensuite étendus à l'agriculture.

	1955	*1980*
Habitants	18 221 000	31 000 000
Consommation totale d'énergie exprimée en calories	16×10^{13}	54×10^{13}
Calories consommées comme combustible	14×10^{13}	$47{,}5 \times 10^{13}$
Calories consommées pour la production d'énergie électrique	2×10^{13}	$6{,}5 \times 10^{13}$
Énergie électrique produite (kWh)	487×10^{7}	279×10^{8}
Total, en calories, par habitant et par an	9×10^{6}	17×10^{6}
kW installés	2×10^{6}	10^{7}
kWh par habitant et par an	266	900

En résumé, on estime que l'Argentine aura besoin en 1980 d'une puissance installée de 10 millions de kW. Nous en possédons actuellement 2 millions et 2 autres millions sont en voie d'installation. Le solde, soit 6 millions de kW, devra être couvert par de l'énergie provenant de sources diverses; comme on le verra en détail dans un autre rapport, la moitié pourrait en être fournie par des centrales électronucléaires.

BIBLIOGRAPHIE

1. Loi n° 14184 promulguée le 29 décembre 1952.
2. Ministerio de Asuntos Técnicos, *Síntesis Estadística Mensual de la República Argentina*, passim.
3. ENDE, *Combustibles Vegetales y Derivados* (memorias). Buenos Aires, 1950/51/52.
4. ENDE, *Boletín de Combustibles*, passim, Buenos Aires, 1948/51.
5. Ministerio de Industria y Comercio — Dirección Nacional de Mineria, *Contribución al Conocimiento de la Producción Mundial de Petróleo*, Buenos Aires, 1954.
6. Organisation des Nations Unies, *Bulletin mensuel de statistique*, New-York, décembre 1953.
7. Organisation des Nations Unies, *Études économiques sur l'Amérique latine*, Mexico, 1950.
8. Climent A. G., *Elementos para el Estudio de la Economia Energética Argentina*, Buenos Aires, 1955.
9. Riekler B., *Conservación de los Recursos Energéticos*, avril 1951.
10. Defilippe B., *La Política Energética Argentina*, Buenos Aires, 1953.
11. Volpi C. A., *El Problema Eléctrico Argentino*, Buenos Aires, 1954.
12. Volpi C. A., *Zonas Económicas de la República Argentina*, Buenos Aires, 1952.
13. Volpi C. A., *Lós Grandes Recursos Hidroeléctricos en la República Argentina*, Buenos Aires, 1953.
14. Maggi J. E., *Energía en la República Argentina*, Buenos Aires, 1951.
15. Maggi J. E., *Política Nacional de la Energía*, Buenos Aires.
16. Intzaugarat A. I., *La Energía Disponible en el País con Vistas a las Necesidades de la Defensa Nacional*, Buenos Aires, 1951.
17. Sorojowich G., *Planificación para el Aprovechamiento de Combustibles y Energía en la República Argentina*, Buenos Aires, 1950.

Besoins et ressources de l'Autriche en énergie électrique et thermique durant les cinquante années à venir

Pour établir des prévisions à long terme concernant les besoins en énergie, compte doit être tenu non seulement des tendances générales du moment, mais aussi de l'état actuel du développement. Après la restauration de l'État autrichien en 1945, la consommation de toutes les sortes d'énergie s'est très rapidement accrue, rendant ainsi possible le redressement de l'économie autrichienne. Si, d'une part, cet accroissement était dû à l'élimination des dommages de guerre et d'après guerre, il résultait, d'autre part, de l'évolution normale de l'économie.

ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

La demande d'énergie électrique a monté en flèche ces dernières années, le taux atteint en 1954 s'est élevé à 12,5 pour cent, dépassant ainsi de beaucoup l'accroissement considéré comme normal pour des pays au même stade de développement. (Un accroissement de 7 pour cent par an équivaut approximativement à des besoins doublés en 10 ans.)

Vu cet accroissement rapide, il semble que l'Autriche atteindra dans un avenir relativement proche le taux élevé de consommation d'énergie électrique par habitant que l'on constate dans d'autres pays très industrialisés. Pour un avenir plus éloigné, il faut prévoir qu'au-delà d'un certain niveau d'électrification, la consommation d'énergie augmentera moins rapidement. Les chiffres suivants représentent la consommation d'énergie prévue, compte tenu des tendances indiquées plus haut :

1950 . .	6,365 milliards de kWh
1960 . .	14,7 milliards de kWh
1970 . .	25,6 milliards de kWh
1980 . .	30,5 milliards de kWh

En Autriche, la production d'énergie est à présent assurée, en majeure partie (74 à 80 pour cent, selon les précipitations), par les centrales hydrauliques, le reste étant produit par des centrales thermiques, alimentées principalement par du combustible national, du lignite surtout. Sans doute, cette fraction de 20 à 25 pour cent fournie par la production thermique restera-t-elle inchangée à l'avenir, aussi la consommation de combustible par les centrales thermiques s'accroîtra-t-elle au même rythme que la production d'énergie tout entière.

Original : anglais.

COMBUSTIBLES

Après le redressement économique de l'Autriche, la demande en combustibles s'est rapidement accrue, dès 1946, mais le taux de cette augmentation s'est considérablement ralenti depuis 1950; à présent, il manifeste seulement une légère tendance ascendante.

Cette évolution est due au fait qu'à la suite d'une électrification intensive — en particulier celle des Chemins de fer fédéraux autrichiens — la consommation de charbon baisse considérablement dans ce secteur, tandis que la demande de combustibles dans le secteur de l'économie domestique demeure plus ou moins inchangée; le secteur industriel présente une légère hausse, et les centrales thermiques augmentent régulièrement leur consommation, en raison de la demande croissante d'électricité.

Sur la base du développement économique prévisible, il est permis de conclure que la tendance présente se maintiendra pendant longtemps, aussi peut-on estimer la consommation de charbon, de pétrole et de gaz naturel comme suit :

1950	60×10^{12} kcal
1960	78×10^{12} kcal
1970	101×10^{12} kcal
1980	126×10^{12} kcal

Le lignite autrichien représente une proportion relativement forte de l'ensemble des combustibles utilisés à l'heure actuelle (la production de lignite a pu être doublée au cours des dernières années) mais il faut prévoir que, dans une trentaine d'années, le rendement de ces gisements diminuera, et que l'Autriche se verra probablement obligée d'importer une bien plus forte proportion de combustibles étrangers.

CONCLUSION

Il ressort de cet exposé sur la situation et les tendances dominantes que l'Autriche a besoin d'énergie supplémentaire, malgré l'abondance de ses ressources en houille blanche et en gisements de pétrole et de charbon. L'Autriche s'intéresse donc vivement à la mise en valeur de nouvelles sources d'énergie, afin de satisfaire à sa demande sans cesse croissante en ce domaine.

Besoins et ressources de la Birmanie en énergie électrique et thermique

par Freddy Ba Hli*

La Birmanie est située dans la zone du sud-est de l'Asie soumise au régime des moussons; actuellement, son économie est essentiellement agricole. Une grande partie de ses installations électriques a été détruite au cours de la guerre et de l'insurrection, qui ont provoqué de grands ravages et entravé l'exécution de nouveaux projets. Toutefois, des plans prévoyant l'électrification générale du pays ont été établis et, maintenant que la situation est redevenue normale, leur exécution avance à un rythme rapide.

Centrales existant actuellement en Birmanie

Rangoon, capitale de la Birmanie, est alimentée en électricité par une centrale thermique à vapeur de 28 000 kW. La puissance installée des centrales desservant les autres villes atteint au total 6 632 kW; chaque jour, ou presque, viennent s'y ajouter des centrales à groupe diesel que l'on installe à titre temporaire dans diverses régions du pays pour pallier l'insuffisance de la production d'énergie électrique jusqu'à ce que soit terminée la construction des centrales hydrauliques. La puissance installée de la Birmanie atteignait 34 632 kW au total en 1951, et elle a passé à 67 000 kW après que de nouveaux générateurs diesel eurent été mis en service. On estime que les besoins du pays s'élèvent actuellement à 92 314 kW.

Coût actuel de l'énergie électrique

A Rangoon, le tarif actuel est de 50 pyas ** (environ 0,105 dollar des États-Unis ou 9 pence), le kilowattheure pour la consommation domestique, et de 25 pyas (0,052 dollar ou 4,5 pence) pour la consommation industrielle.

Sources de chaleur actuellement exploitées

En Birmanie, le bois est le combustible de la majeure partie des ménages et des industries artisanales. Dans les villages, la population va ramasser ou couper le bois dans les forêts voisines, et l'on considère qu'il ne lui coûte rien puisque ce travail n'est pas rémunéré. La population des villes doit cependant acheter le bois dont elle a besoin. Certains citadins se servent de poêles à pétrole ou à charbon de bois. Les ménages comprennent en moyenne cinq personnes, et les besoins normaux en chaleur atteignent l'équivalent de 2 milliards de kilowattheures environ pour l'ensemble de la population.

Coût actuel des combustibles servant à produire de la chaleur

Le chauffage au gaz ou à l'électricité est pratiquement inconnu en Birmanie, car il n'existe aucune usine à gaz fournissant du gaz à la population et les tarifs de l'électricité y sont très élevés. Nous ne devons donc examiner que le coût des combustibles. Comme on l'a déjà indiqué, les populations rurales se procurent généralement leurs combustibles sans dépense d'aucune sorte. Quel que soit le travail nécessaire au ramassage du bois, il n'est pas compté en termes monétaires, car ce sont les enfants, ou les adultes pendant leurs heures de loisir, qui vont ramasser ou couper le bois.

En ce qui concerne les citadins ou les artisans qui ont besoin de combustibles, le coût total du combustible serait de l'ordre de 100 millions de kyats (20 millions de dollars ou 7,5 millions de livres sterling) par an pour l'ensemble du pays, les ménages consacrant en moyenne 70 kyats (14 dollars ou 5 livres sterling) par an à l'achat des combustibles nécessaires à la cuisson des aliments. S'ils se servaient d'électricité, la dépense serait en moyenne de 200 kyats par ménage et par an (40 dollars ou 15 livres sterling).

Besoins et approvisionnements futurs

Les besoins du pays en chaleur resteront essentiellement les mêmes, encore qu'ils augmentent chaque année dans la même proportion que la population. Comme par le passé, ils seront satisfaits en majeure partie au moyen du bois. La consommation du pétrole, combustible d'un emploi commode, augmente légèrement. La population en viendra également à utiliser la cuisinière à chaleur solaire maintenant que l'Institut de recherche appliquée de l'Union birmane a mis au point un convertisseur de chaleur solaire très simple et avantageux (il coûte

---

Original : anglais.

* Directeur du Centre de l'énergie atomique de l'Union birmane.

** 100 pyas = 1 kyat = 0,21 dollar = 0,074 livre sterling.

20 kyats, soit 4 dollars ou 1,5 livre sterling) qui n'entraîne aucune dépense de combustible.

On estime à 50 000 kW la charge à prévoir pour Rangoon en 1957 (éclairage domestique et courant industriel), tandis que la consommation annuelle dépassera probablement 100 millions de kilowattheures. En 1960, la puissance installée atteindra probablement 180 000 kW au total pour la Birmanie; le prix de vente moyen de l'énergie produite dans les centrales hydrauliques sera de 12 pyas (0,025 dollar ou 2 pence) le kilowattheure dans les villes, qui consommeront au total 600 millions de kilowattheures par an. La construction des centrales entraînera des dépenses en capital de l'ordre de 350 millions de kyats (70 millions de dollars ou 26 millions de livres sterling).

Dans un demi-siècle, à supposer que les besoins en énergie électrique augmentent normalement et ne subissent aucune modification radicale, la Birmanie aura besoin de quelques millions de kilowatts, et sa consommation totale (y compris l'énergie à laquelle certains feront appel à cette époque pour la production de chaleur et la cuisson des aliments) s'élèvera à 60 milliards de kilowattheures par an. Les ressources hydrauliques ne produiront qu'environ un million de kilowatts, aussi la Birmanie devra-t-elle, dans l'intervalle, s'adresser à d'autres sources d'énergie.

Importance de l'énergie nucléaire pour l'économie des régions pré-industrialisées

Dans les régions purement agricoles, il faudra peut-être faire appel à l'énergie éolienne ou à des générateurs électriques à moteur à essence pour obtenir de l'électricité. Le prix de revient du kilowattheure d'énergie produit dans ces conditions est supérieur à celui de l'électricité obtenue dans une centrale thermique d'un rendement satisfaisant, mais il est plus avantageux, n'entraînant que de faibles dépenses en capital.

On a vu plus haut que le coût de production de l'électricité est élevé dans une région pré-industrialisée, même dotée d'une centrale thermique; à Rangoon, par exemple, le prix de vente est de 50 pyas (0,105 dollar ou 9 pence) le kilowattheure pour le courant à usage domestique.

L'électricité ne peut être distribuée à bon marché que si l'on dispose d'une centrale hydraulique bien située par rapport à un centre ou à des centres de consommation importants. Pour l'énergie hydroélectrique, les tarifs restent élevés dans les centres de consommation, environ 12 pyas (0,025 dollar ou 2 pence le kilowattheure), si l'électricité doit être transportée sur de grandes distances.

Or, dans un pays passant d'une économie agricole à une économie industrielle, il n'est pas toujours possible de construire des centrales hydrauliques en des emplacements bien situés par rapport aux centres de consommation d'une certaine importance. En de pareilles circonstances, l'énergie électronucléaire aura de fortes chances d'être la solution idéale, surtout dans un pays qui possède quelques gisements de minerais radioactifs.

La centrale électronucléaire de faible puissance (20 000 kW) qui pourrait produire de l'électricité au prix de 20 pyas (0,042 dollar ou 3 pence) le kilowattheure, pour un investissement en capital de 80 millions de kyats (16 millions de dollars ou 5 millions de livres sterling) trouverait probablement de bons débouchés dans notre pays.

En outre, une centrale équipée d'une pile de 250 000 kW qui coûterait 300 millions de kyats (60 millions de dollars ou 22 millions de livres sterling) et produirait de l'énergie au prix de 4 pyas (0,008 dollar ou 2/3 de pence) le kilowattheure, pourrait concurrencer une centrale hydraulique de même capacité qui serait éventuellement installée dans la région.

L'électricité dans les différentes régions du Canada — Quelques prévisions dans le domaine de l'énergie nucléaire

par J. Davis *

Dans quelle région du Canada verra-t-on d'abord l'énergie électronucléaire faire concurrence aux autres sources d'énergie électrique ? C'est là une question à laquelle il n'est pas facile de répondre. La réponse exige en effet que soient remplies deux conditions générales. La première c'est que les coûts de l'énergie électronucléaire soient prévisibles (voir à ce sujet le mémoire P/11 de la présente Conférence *Prévisions économiques du rôle de l'énergie électronucléaire au Canada*, par J. Davis et W. B. Lewis). La seconde condition, c'est que l'on connaisse de façon approfondie les tendances régionales, passées, présentes et futures, de la demande et de l'offre d'énergie électrique au Canada.

C'est là demander beaucoup. Aussi ferons-nous, au départ, plusieurs hypothèses. Nous supposerons connu, par exemple, le coût de l'énergie que produiront les centrales électronucléaires. Nous ferons certaines réserves quant à la production optimum. Enfin, nous ne nous occuperons que des seuls besoins en énergie qui sont suffisamment continus. Nous supposerons :

1. Que l'on pourra construire, en vue d'un service prolongé, des centrales de moyenne et grande puissance d'une capacité de 100 000 kilowatts, capables de produire l'énergie électrique livrée au centre de consommation au prix d'environ 0,006 dollar, lorsqu'elles fonctionnent 80 pour cent du temps ou davantage;

2. Que des centrales relativement petites de 2 000 à 3 000 kilowatts, capables : *a*) de produire de l'énergie électrique pour la charge de base à un coût d'environ 0,020 dollar le kilowattheure; et *b*) de fournir, comme sous-produit, de la chaleur pour le chauffage, auront été suffisamment mises au point pour pouvoir être construites en nombre considérable.

Ces critères admis, nous pouvons commencer notre enquête et passer en revue les provinces canadiennes afin de déterminer, d'une façon générale, quelles régions et quelles industries profiteront le plus de l'installation de génératrices nucléaires.

Si nous comparons les prix indiqués ci-dessus aux prévisions relatives à la consommation et au prix, au stade de la consommation, des autres sources d'énergie, nous devons pouvoir évaluer convenablement l'importance de l'énergie électronucléaire pour les différentes régions du Canada.

Le Canada est particulièrement riche en sources d'énergie. De vastes régions du pays jouissent d'une abondance de houille blanche à bon marché. Ces ressources ont servi à assurer le développement industriel et commercial. Dans certaines régions, cependant, les bons emplacements hydroélectriques sont rares et il a fallu construire des usines thermiques. Utilisant le charbon, le mazout et, plus récemment, le gaz naturel, elles sont, pour la plupart, d'un fonctionnement plus onéreux. C'est seulement depuis quelques années, à la suite de la réduction considérable des besoins de combustibles et des frais d'équipement des centrales thermiques, que l'on constate une diminution de l'écart entre les prix de l'énergie, livrée aux consommateurs, dans les régions riches et dans les régions pauvres en ressources hydrauliques.

Il s'est produit le phénomène suivant : la consommation a augmenté partout, et rapidement, et le prix de l'électricité, livrée au consommateur, a baissé. Même dans les régions les moins favorisées, l'ensemble de ces demandes d'énergie est désormais tel qu'il est possible de construire des centrales de moyenne et grande puissance. Par ailleurs, le combustible est moins cher. Cela est particulièrement vrai du mazout et du gaz naturel. Alors qu'autrefois leur utilisation était géographiquement très limitée, ces combustibles sont accessibles à des prix raisonnables dans la plupart des régions grâce à des pipe-lines à grand diamètre et à des bateaux-citernes.

Au contraire, du fait de l'aménagement hydroélectrique de sites moins accessibles, le coût de l'énergie produite par la houille blanche augmente. Même les améliorations récentes qui ont eu lieu dans les transports d'électricité à longue distance ne suffisent pas à compenser ce renchérissement. C'est que dans certaines régions du pays, où la houille blanche était auparavant la seule source d'énergie électrique, l'électricité produite à partir du charbon ou du gaz naturel est maintenant moins chère que l'énergie hydraulique.

Cette électricité peut alimenter le même réseau. Les centrales hydrauliques et les centrales thermi-

Original : anglais.

* Département économique, Ministère de l'industrie et du commerce, Ottawa.

ques, grâce à leurs modes de fonctionnement différents, peuvent fort bien coexister, et bien souvent se compléter. Il en résulte des économies substantielles pour l'ensemble du réseau de distribution d'une même région.

Les centrales électronucléaires, le jour où elles entreront en activité, ne remplaceront vraisemblablement pas nos sources présentes d'énergie. Tout comme les centrales thermiques au charbon que l'on construit en ce moment dans les régions qui, autrefois, consommaient seulement de l'énergie hydroélectrique, les centrales électronucléaires coexisteront avec les autres sources, plus traditionnelles, d'électricité. Coûteuses à construire, elles devront fonctionner plus ou moins continuellement si le coût moyen de production de l'électricité doit être abaissé. Le rôle de la centrale électronucléaire sera donc de fournir au réseau sa charge minimum. Les autres centrales pourront ne fournir que la charge d'appoint.

Dans la mesure où il existe des réservoirs saisonniers, l'énergie hydroélectrique sera utilisée en période de pointe. Les vieilles centrales moins efficaces (au charbon, au mazout ou au gaz) pourront aussi servir de façon intermittente, pour répondre à la demande exceptionnelle des périodes de pointe. A cause des grandes variations de la consommation qui continueront de se produire tous les jours et durant toute l'année, il faudra construire davantage de centrales de chaque type (nucléaire et traditionnel). La charge de base des réseaux augmentera, et aussi la demande d'énergie d'appoint. Les centrales électronucléaires qui devront fournir l'essentiel de l'énergie à cause de leurs caractéristiques particulières (du point de vue du coût de la production), seront complétées par des centrales de type traditionnel. Elles fourniront une partie de l'électricité nécessaire, mais non la totalité. Et l'importance de leur apport dans ce domaine dépendra essentiellement de la façon dont elles pourront, comparées aux centrales électriques et thermiques, satisfaire les besoins permanents de chaque région.

Si le choix du coût de production le plus bas est un des critères dont il faut tenir compte, le taux d'utilisation, nous le voyons maintenant, en est un autre. Compte tenu des limites ainsi imposées, et eu égard aux dimensions optima de notre centrale électronucléaire, examinons de plus près les diverses régions du Canada consommatrices d'énergie.

La première de ces régions, celle dont il est le plus souvent question, est le sud de l'Ontario. Dans cette région, la demande croissante d'énergie électrique aura, vers le début de 1960, largement dépassé les ressources hydroélectriques. Des centrales d'énergie thermique devront donc être construites de toute façon dans cette province. La question qui se pose alors est de savoir s'il sera plus économique de fournir la charge de base en construisant des génératrices nucléaires, ou en ayant recours, de plus en plus, à du combustible importé des États-Unis d'Amérique.

Les ressources de l'Ontario en combustible indigène sont limitées. Il est peu probable que le gaz naturel combustible, onéreux, soit utilisé pour produire de l'énergie électrique. D'autres usagers paient des prix plus élevés pour le mazout; il ne faut donc pas, à cause de son prix, compter sur ce produit pour alimenter les centrales. Reste le charbon. Livré à Toronto ou à Windsor au prix très bas de 8 dollars la tonne courte (environ 907 kg), il peut produire de l'énergie électrique, près des centres principaux de distribution de la région, pour à peine 0,006 dollar le kilowattheure. L'objectif minimum de nos centrales nucléaires de moyenne ou de grande puissance devra donc être de fournir de l'électricité au même prix si elles veulent vraiment concurrencer les centrales thermiques dans cette région du Canada où elles semblent avoir le plus d'avenir.

« Concurrencer » n'est pas d'ailleurs le terme juste. Une centrale thermique au charbon peut fournir au secteur sa charge de base durant ses premières années d'existence, puis plus tard ne plus fournir que la charge d'appoint et, enfin, ne fournir que l'énergie nécessaire aux périodes de pointe. A mesure qu'elle vieillit, elle cède la place à des centrales au charbon mieux équipées et, vraisemblablement, plus complexes et plus coûteuses. Les centrales thermiques peuvent donc s'accommoder des améliorations continues apportées à l'équipement et aux méthodes de fonctionnement et d'utilisation des combustibles.

Les centrales électronucléaires, au contraire, ne jouissent pas d'un tel avantage. Comme elles exigent des investissements élevés au départ et que, du point de vue du coût de production, elles réclament peu de combustible, il n'y a guère intérêt à les fermer par la suite. Leur rôle initial, en d'autres termes, est leur rôle permanent. Les compagnies d'électricité, en prévision des améliorations techniques substantielles que d'autres pourraient apporter (ce qui réduirait naturellement leurs dépenses d'investissements), pourraient être tentées de retarder la construction de centrales électronucléaires. Cet obstacle disparaîtra quand la mise de fonds nécessaire pour la construction et l'outillage d'une centrale électronucléaire sera plus voisine de celle que requièrent les centrales thermiques traditionnelles. En attendant, l'obstacle existe et tend à retarder la construction de centrales électronucléaires, que l'on aurait dû voir se multiplier beaucoup plus rapidement dans ce pays.

Parmi les régions favorables, celle qui se placera au deuxième rang dans le domaine de l'énergie nucléaire est la région des Provinces maritimes. A l'exception de quelques sites sur la rivière Saint-Jean dans le Nouveau-Brunswick, la plupart des ressources hydrauliques des Provinces maritimes ont déjà été aménagées. On devra donc faire de plus en plus appel à l'énergie thermique pour satisfaire la demande croissante d'électricité de cette région de l'est du Canada.

Les centrales électronucléaires offrent des possibilités, principalement au point de vue du coût. Le charbon canadien est difficile à extraire et son transport aux centres principaux de consommation d'énergie est coûteux. Les quantités de mazout que peuvent fournir les raffineries locales sont limitées. Le gaz naturel est pratiquement inexistant, et l'on n'a pas encore découvert de procédé permettant de brûler les schistes bitumineux de la région pour produire de l'énergie à des prix qui puissent soutenir la concurrence avec les autres sources d'énergie. Si on laisse de côté, pour le moment, la possibilité d'utiliser du fuel-oil importé à bon marché, le maximum que l'on puisse sans doute espérer avec les combustibles d'origine locale est un coût de production moyen de 0,008 dollar le kilowattheure.

Les considérations de coût militent donc en faveur de l'établissement d'une centrale électronucléaire dans les Provinces maritimes. Par contre, du point de vue de la demande d'énergie, les choses sont moins encourageantes. La plupart des marchés actuels sont très dispersés, et les réseaux existants, faute d'interconnexions, ont construit un certain nombre d'installations qui, si la distribution d'énergie électrique de la région était mieux coordonnée, deviendraient inutiles parce qu'excédentaires. Les accroissements à prévoir dans la demande sont, par conséquent, relativement modestes si on les compare à ceux du sud de l'Ontario. Si l'on ajoute que la charge des divers réseaux est très variable et que, de ce fait, la situation se présente ici sous un jour moins favorable, on comprendra que le moment n'est pas encore venu où les centrales électronucléaires de moyenne et grande puissance remplaceront les centrales thermiques traditionnelles.

Une coordination des divers réseaux de distribution changerait, cependant, considérablement la situation. L'accroissement de la puissance installée de la région pourrait intéresser la plupart, sinon tous les secteurs de consommation de la Nouvelle-Écosse et du Nouveau-Brunswick, et même le nord du Maine et les régions avoisinantes du Québec. L'accroissement régulier de la demande, d'année en année, justifierait l'installation d'une centrale électronucléaire de moyenne ou de grande puissance. La construction de nouvelles centrales thermiques fonctionnant au charbon pourrait être retardée pendant un certain temps. Et l'énergie hydroélectrique du Nouveau-Brunswick pourrait être employée, à mesure qu'elle deviendrait disponible, soit comme charge de base durant les mois d'écoulement maximum, soit pendant les périodes de pointe le reste de l'année. Un réseau bien coordonné pourrait, dans les Provinces maritimes, jouir de tous les avantages — ceux de la houille blanche, du charbon et de l'énergie nucléaire. Toutes ces centrales fonctionneraient plus ou moins en même temps pour satisfaire à la demande croissante d'énergie de l'ensemble de la région.

La possibilité d'importer les résidus bon marché des raffineries de pétrole, complique encore la situation. Durant les dernières années, le mazout des raffineries étrangères a été offert à des prix nettement inférieurs à celui des charbons de la région. Voilà, en dernière analyse, le genre de concurrence auquel devront faire face nos centrales nucléaires. Le coût de l'énergie produite sur nos côtes par un certain nombre de centrales qui utilisent ce combustible importé est approximativement 0,007 dollar le kilowattheure. A prix égal, l'énergie nucléaire devra, sans aucun doute, être préférée. Le prix du mazout varie plus ou moins, suivant les taux de fret des navires pétroliers. Les centrales électronucléaires, qui subiront moins les effets désorganisateurs de la guerre ou du manque de bateaux, seront donc préférables parce que d'un fonctionnement plus régulier. Cependant, la possibilité d'une nouvelle baisse du prix mondial des huiles lourdes et les incertitudes entourant l'établissement d'un réseau intégré de distribution d'énergie électrique dans les Provinces maritimes, font que l'introduction de centrales atomiques n'est rien moins que certaine dans les provinces de la côte atlantique.

Voyons maintenant le sud du Manitoba. Ici, dans la région est des Prairies, l'augmentation de la consommation d'énergie électrique est plus en rapport avec les dimensions optima des centrales électronucléaires que nous envisageons de construire. Par suite d'une plus grande diversification de l'industrie, les conditions d'équilibre de la charge du réseau militent en faveur de la construction échelonnée, à quelques années d'intervalle, de centrales de moyenne et grande puissance destinées à fournir la charge de base au réseau électrique. Du point de vue de l'approvisionnement du réseau, une autre série de conditions, très différentes, doivent être satisfaites. L'approvisionnement lui-même ne pose pas de problème. De nombreuses ressources hydroélectriques, de l'ordre de plusieurs millions de kilowatts, restent à aménager dans le nord et le centre de la province. D'autre part, du gaz naturel ou du lignite peuvent être livrés, et livrés à des prix modérés, à des centrales thermiques construites au cœur des principaux centres de consommation. Le prix de l'énergie livrée au consommateur, plutôt que l'existence ou la non-existence du combustible, doit être ici le facteur déterminant.

Ce sont les événements, c'est-à-dire l'accroissement continu de la demande, qui décideront vraisemblablement de l'issue de ce conflit d'ici un an ou deux. Il sera bientôt nécessaire de construire une importante centrale. Peut-être choisira-t-on une centrale hydraulique. S'il en est ainsi, il faudra la situer dans le nord de la province, ce qui implique une lourde mise de fonds initiale pour les barrages, les réservoirs, les lignes de transport à longue distance. Une fois qu'un programme aussi important de placement de capitaux aura été entrepris, il ne sera plus question de revenir en arrière. Les économies dues à l'utilisation plus intensive des installations anciennes, généralement plus coûteuses, faciliteront par la suite les projets d'aménagement

des rivières Saskatchewan et Nelson. Ceci, joint à l'utilisation accrue de barrages destinés à régulariser le débit des cours d'eau, permettra d'utiliser, en permanence, une proportion croissante de cette énergie hydraulique. Cette nouvelle énergie pourra, pendant des années, occuper la place qui, dans d'autres circonstances, aurait été tenue par l'énergie nucléaire et elle pourrait empêcher l'installation de centrales nucléaires. L'aménagement, dans les prochaines années, de ces ressources hydrauliques pourra, en fait, retarder jusque vers 1975, ou même plus tard, l'utilisation de l'énergie nucléaire dans la région est des Prairies.

L'autre solution est le recours à l'énergie thermique. On pourrait encore maintenant construire à Brandon ou à Winnipeg une centrale thermique de 100 000 kilowatts qui brûlerait les combustibles disponibles actuellement. Le coût de l'énergie serait d'environ 0,006 à 0,007 dollar le kilowattheure. Plus tard, lorsque d'autres sources d'énergie seront disponibles, cette centrale pourrait fournir une énergie d'appoint. Elle compléterait l'énergie hydroélectrique venue du nord et fonctionnerait à côté d'usines thermiques plus modernes qui seraient construites par la suite. Enfin, elle pourrait servir pendant les périodes de pointe à côté de l'énergie d'origine atomique. Une centrale électronucléaire ne pourrait remplir aucun de ces rôles. Par conséquent, ce n'est que si l'énergie électronucléaire peut être produite à 0,006 dollar le kilowattheure ou moins, qu'elle aura des chances de jouer un rôle utile dans le sud du Manitoba.

Après avoir examiné les quelques régions où l'énergie électronucléaire peut entrer en concurrence avec les autres formes d'énergie, voyons comment la situation se présente dans les autres régions du Canada.

En Colombie britannique, la houille blanche restera vraisemblablement la principale source d'électricité pendant de nombreuses années encore. On peut encore construire de nombreux barrages, et il y a aussi des possibilités indirectes, la Province pouvant importer du courant des États-Unis d'Amérique en contre-partie de l'établissement de barrages-réservoirs sur son territoire. Il devrait donc y avoir des excédents d'énergie électrique jusqu'en 1980 et au-delà. D'autre part, le coût de l'énergie sera faible par comparaison avec les autres provinces mentionnées plus haut. Pour être tant soit peu intéressante, l'énergie thermique pour la charge de base ne devrait pas coûter plus de 0,005 dollar le kilowattheure. Telles sont les principales raisons pour lesquelles les réseaux électriques de la Colombie britannique bénéficieront sans doute les derniers de l'introduction de l'énergie atomique.

Dans l'ouest et le centre des Prairies, les combustibles sont abondants et exceptionnellement bon marché. Le charbon peut être extrait à ciel ouvert et converti en électricité pour moins de 0,004 dollar le kilowattheure et, même à ce prix, le gaz naturel, moins cher, lui sera souvent préféré. De grandes centrales thermiques de type plus ou moins traditionnel, complétées dans l'ouest de l'Alberta par de la houille blanche et ailleurs par du gaz naturel brûlé dans des turbines à gaz, satisferont donc la majeure partie, sinon la totalité de la demande croissante d'électricité en Alberta et en Saskatchewan.

La situation dans le Québec est, à certains égards, analogue à celle de la Colombie britannique. Des ressources considérables de houille blanche restent encore à aménager, moyennant des frais raisonnables, aux portes mêmes de Montréal. D'autres installations qui permettront d'atteindre un prix voisin de 0,005 dollar le kilowattheure, peuvent être créées sur un certain nombre de rivières coulant au sud ou à l'est vers le golfe du Saint-Laurent, au nord ou à l'ouest vers la baie d'Hudson. Ces ressources hydroélectriques et la construction de centrales d'appoint au charbon ou au mazout (que l'on compte installer dans les années à venir) devraient permettre de tenir pendant vingt ou trente ans avant d'avoir épuisé tous les avantages que comporte la production d'électricité par les moyens actuels.

Dans les autres régions du Canada (et notamment au Yukon, dans les territoires du Nord-Ouest et de Terre-Neuve), les réseaux distributeurs d'électricité sont encore dans l'enfance : ou l'on emploie des groupes diesel pour produire l'électricité, ou l'on achète celle-ci aux grandes industries qui traitent le bois ou les métaux et qui ont elles-mêmes plus ou moins besoin d'énergie hydroélectrique à bon marché. De plus, leur faible augmentation de consommation et le taux d'utilisation, du fait des variations considérables de la demande commerciale et de la demande des particuliers, tendent à exclure l'emploi de l'énergie électronucléaire.

Après avoir étudié le pour et le contre de l'introduction de centrales électronucléaires au Canada, du moins dans les régions où les réseaux distributeurs d'électricité sont le plus développés, voyons maintenant les applications industrielles particulières de l'énergie électronucléaire. Considérons de plus près les besoins de celles des industries manufacturières qui recherchent une exploitation rationnelle des ressources naturelles. Ces industries s'installent près d'une source d'énergie à bon marché ou recherchent un approvisionnement rapide en matières premières, ou bien encore elles veulent les deux à la fois. En raison d'une similitude de technique et de la nécessité d'une source continue d'électricité à bon marché, on peut ajouter à ces industries les industries de transformation des matières premières importées.

La première industrie qui vient à l'esprit est celle de l'aluminium. Comme le savent tous ceux qui sont au courant du développement économique du Canada, l'affinage électrolytique de ce métal se fait actuellement sur une grande échelle au Canada. Pourquoi cela ? Et pourquoi faut-il prévoir d'autres progrès dans cette direction ? La réponse à ces questions est que le Canada dispose d'énergie électrique

à très bon marché près des voies d'eau accessibles aux navires de haute mer. L'énergie électrique à bas prix, ainsi que les avantages d'un transport à bon marché vers et à partir des installations d'affinage, ont, jusqu'ici, largement compensé l'éloignement des marchés quand il s'est agi de choisir l'emplacement de cette industrie.

Aussi longtemps qu'il restera à aménager au Canada des ressources hydrauliques équivalant à plus de 1 million de kilowatts et capables de fournir l'électricité au prix de 0,003 dollar le kilowattheure ou moins, il y a peu de chance que l'énergie électronucléaire détrône la houille blanche. Avec le temps, et cela pourra prendre plusieurs décennies, la différence de prix entre les producteurs qui traitent l'aluminium au voisinage des centrales hydrauliques et ceux qui traitent la bauxite et affinent l'aluminium en d'autres endroits, pourra diminuer au point de disparaître. La croissance de l'industrie canadienne de l'aluminium risque d'être alors arrêtée. La production à très bon compte d'énergie électronucléaire à proximité des principaux marchés de l'aluminium empêchera peut-être l'extension de la production de lingots d'aluminium dans ce pays. L'alumine, extraite et préparée dans les régions tropicales, sera traitée non plus au Canada, mais dans l'est des États-Unis d'Amérique, au Royaume-Uni ou en Europe occidentale. On peut même conclure que si les savants et les ingénieurs parviennent à abaisser le coût de l'énergie nucléaire aux environs de 0,004 dollar le kilowattheure, ils auront mis fin à ce qui a été jusqu'à présent l'un des plus grands avantages naturels du Canada, savoir l'existence d'une énergie relativement bon marché pour la production de métaux légers.

Les mêmes arguments sont valables en ce qui concerne les projets tendant à installer une ou plusieurs fonderies soit sur la côte est, soit sur la côte ouest du Canada. Il ne serait certainement pas économiquement rentable d'y importer des matières premières pour les traiter au four électrique si les frais de transport n'étaient compensés par des tarifs d'électricité favorables.

Heureusement pour le Canada, certaines de ces industries électrométallurgiques et électrochimiques s'installent près des sources d'énergie hydroélectriques pour des raisons autres que le faible coût de l'électricité. Les concentrés minéraux représentent souvent des tonnages très importants. Étant donné que leur volume peut être réduit considérablement par fusion et affinage à la mine même ou près de la mine, il est parfois préférable de produire sur place l'énergie électrique plutôt que de transporter ces concentrés vers des centres où le coût de l'électricité est moins élevé.

Tout dépend évidemment du minerai. Les minerais communs à moyenne ou faible teneur gagnent à être traités sur place. Les frais de transport sont alors réduits au minimum. De plus, d'autres métaux et quantité de produits chimiques peuvent être vendus comme sous-produits de cette opération. Mais il en est tout autrement des minerais de fer, qu'on n'a guère avantage à convertir sur place en fonte ou en acier, à cause du rendement bien supérieur du haut fourneau par rapport au four électrique, et de la nécessité que cela implique d'être à proximité des marchés de matières premières, comme le charbon et la ferraille.

Entre ces deux extrêmes, on peut citer toute une série de minéraux dont il existe, on le sait, des gisements dans ce pays. Quelles sont les perspectives de traitement de ces minéraux au four électrique? Les métaux « nobles », et particulièrement le cuivre, peuvent être fondus sans emploi d'électricité et expédiés à des distances considérables sous forme de cuivre blister. Les éléments d'alliage de l'acier tels que le nickel, le cobalt et le manganèse peuvent, selon la complexité et la qualité du minerai, être transportés économiquement, sous forme de concentrés, à des centaines de kilomètres de distance. Même le titane peut être réduit et exporté sous forme de scories riches en titane, sans que la dépense d'électricité soit trop élevée. Lorsque les prix des métaux moins connus, et notamment du titane, auront considérablement baissé et que leur vente atteindra un volume comparable à celui de l'aluminium, alors, mais alors seulement, il deviendra possible d'installer de grandes usines génératrices d'électricité pour isoler ces métaux.

Si jamais de telles industries isolées se développent dans le nord de l'Ontario, du Québec ou du Labrador elles y trouveront en suffisance l'énergie hydraulique à bon marché qui leur sera nécessaire. Il en sera de même des usines d'affinage que l'on pourra construire dans la région ouest des montagnes Rocheuses, qui entourent la plus grande partie de la Colombie britannique et du Yukon. Si ces industries s'installent dans l'ouest de l'Ontario ou s'alimentent directement aux mines du bouclier canadien qui borde la région des Prairies, elles auront à leur disposition du gaz naturel. Le traitement chimique pourrait, selon la teneur et la complexité des minerais, éliminer complètement l'affinage électrolytique. A certains indices, il semble que l'on aura de plus en plus tendance à traiter certains concentrés (plus particulièrement ceux de nickel et de cobalt) près des puits de gaz naturel. L'énergie électronucléaire ne sera donc guère utilisée dans les régions qui, du moins jusqu'à une date récente, étaient les principales régions productrices de métal du pays.

Cependant, il peut y avoir des exceptions. Les Provinces maritimes, nous l'avons dit plus haut, sont handicapées par le manque d'électricité à bon marché. De vastes gisements de métaux communs ayant été découverts récemment au voisinage de Bathurst, on approfondit les problèmes de leur traitement, et on se demande s'il sera moins onéreux, après avoir extrait et concentré ces minerais, de les faire traiter ailleurs, ou s'il ne vaudrait pas mieux que certains concentrés volumineux soient traités par électrolyse près des mines mêmes.

Plus le coût de l'énergie est faible, plus il est avantageux de traiter les minerais sur place.

Cependant, l'industrie accepterait peut-être de payer 0,006 dollar par kilowattheure pour l'affinage du plomb, où les frais d'électricité ne constituent pas une fraction importante du coût du produit affiné. La fabrication des sous-produits chimiques dépend encore du prix de l'électricité. Elle pourrait, elle aussi, se développer sans que le prix de l'électricité gêne sérieusement son expansion. D'après les indications actuelles, l'implantation d'industries de ce genre exigera, au total une puissance installée de plus de 100 000 kilowatts. La création d'une industrie électrométallurgique et électrochimique dans le nord du Nouveau-Brunswick pourrait donc bien offrir l'une de ses premières chances à l'énergie électronucléaire; grâce à celle-ci on verrait s'établir au Canada des types nouveaux et différents d'activité économique.

Nous n'avons encore rien dit de la quantité énorme de chaleur que donneront, comme sous-produit, les futures centrales électronucléaires. Cette chaleur ne pourrait-elle pas être utilisée ? Il faut évidemment considérer ici les usines de transformation des matières premières, qui achètent de l'énergie électrique et du combustible pour produire de la vapeur. L'industrie la plus importante du Canada, celle de la pâte et du papier, vient immédiatement à l'esprit. Une fabrique de papier d'importance moyenne (il y en a plus de 120 au Canada) exige de 30 000 à 40 000 kilowatts de puissance installée. Le facteur de charge est élevé. La fabrique peut consommer chaque année jusqu'à 100 000 tonnes de charbon ou d'équivalent de charbon pour broyer, cuire et lessiver le bois que l'on transforme en pâte. Pour les besoins de cette industrie, le coût de l'énergie électrique nucléaire n'est nullement la seule considération dont il faille tenir compte. Il faut aussi penser au dégagement de chaleur de la pile, qui rend l'opération beaucoup plus intéressante et pourrait justifier l'installation, dans les régions du pays où les prix des combustibles sont relativement élevés, de centrales nucléaires polyvalentes.

Cette question mérite une étude plus approfondie particulièrement en ce qui concerne les régions forestières du Canada non encore industrialisées, où l'on trouve du bois et des moyens de transport mais où l'énergie électrique est par ailleurs chère ou en quantité insuffisante. De nouvelles régions forestières de la Nouvelle-Écosse, du Nouveau-Brunswick, et probablement même du nord de l'Ontario, pourraient être mises en exploitation grâce à l'énergie nucléaire.

Jusqu'à présent, nous n'avons étudié que les centrales électronucléaires de moyenne et grande puissance. Examinons maintenant les petites installations de 2 000 à 3 000 kilowatts, dont nous avons parlé au début de cette étude. Évidemment, si l'on veut les utiliser commercialement, il faut les construire de manière à répondre à des besoins beaucoup plus modestes. Même si ces centrales ne doivent fournir qu'une charge de base, elles remplaceront les centrales à groupes diesel. Pourquoi ? Parce que c'est à cette échelle de production d'énergie que ce « maître Jacques », le moteur à combustion interne, a été surtout utile jusqu'à présent.

D'après les indications dont on dispose, l'énergie électronucléaire ne pourra pas être produite en aussi petite quantité à moins de 0,020 dollar environ le kilowattheure. Cela exclut immédiatement plusieurs régions du Canada et, parce que ce prix est trop élevé, les régions où le mazout peut être livré à moins de 0,20 dollar le gallon. Sont exclues aussi les industries dont la consommation d'électricité varie considérablement durant la journée et d'un mois à l'autre. Restent donc, essentiellement, les importantes agglomérations minières du Grand Nord canadien. Les difficultés inhérentes aux transports par voies de terre et à l'éloignement étant, dans une certaine mesure, supprimées, il sera possible, grâce à l'électricité d'origine nucléaire et à son sous-produit, la chaleur, de choisir bien plus librement l'emplacement des exploitations minières.

Dans cette étude, je n'ai donné ni statistiques ni chiffres concernant la puissance installée passée, présente et future des centrales, et je n'en ai pas discuté la valeur. Des renseignements ont été soumis à ce sujet au secrétariat de cette Conférence. Compte tenu de ces données, l'analyse de la demande future, catégorie par catégorie et région par région (en partant des hypothèses, indiquées plus haut, relatives au prix de revient de l'énergie électronucléaire), permet d'aboutir aux conclusions suivantes :

1. Au moins 10 centrales électronucléaires de moyenne ou de grande puissance (100 000 kilowatts) seront peut-être nécessaires au Canada aux alentours de 1970. La majorité de ces centrales seront probablement, comme je l'ai indiqué, situées dans le sud de l'Ontario. Mais il en faudra peut-être d'autres dans les Provinces maritimes, voire dans le sud du Manitoba.

2. Il faudra sans doute beaucoup plus de centrales électronucléaires de 2 000 à 3 000 kilowatts. Toutefois, la part de ces petites installations polyvalentes sera sans doute beaucoup plus modeste dans l'équipement énergétique de la nation. Elles seront employées dans le Grand Nord canadien.

3. Des centrales de puissance intermédiaire pourront fournir une énergie utile à des industries comme celle de la pâte et du papier, où l'on peut utiliser la chaleur, sous-produit des piles atomiques. Des centrales de ce genre pourraient être installées en Nouvelle-Écosse, au Nouveau-Brunswick, et peut-être aussi dans le nord de l'Ontario.

Si ces objectifs sont atteints, l'énergie électronucléaire aura donné une nouvelle impulsion au développement industriel du Canada. Elle aura, d'une part, fixé un plafond au coût de production de l'électricité et, d'autre part, aidé à réduire la différence actuelle des prix de l'électricité entre les différentes régions productrices d'énergie du Canada.

Le rôle de l'énergie électronucléaire dans le plan d'expansion de l'énergie en Chine au cours des cinquante années à venir

par Yun-Suan Sun *

ESTIMATION DES BESOINS DE LA CHINE EN ÉNERGIE ÉLECTRIQUE POUR LES CINQUANTE ANNÉES A VENIR

La Chine a toujours été un pays agricole; sauf dans quelques régions disséminées sur le territoire, où l'industrie s'est développée dans une certaine mesure, l'économie de la Chine est restée essentiellement agraire en raison d'une situation militaire et politique instable depuis cent ans.

Bien que la production de l'énergie électrique ait commencé en Chine il y a plus de soixante-dix ans, des conditions économiques défavorables ont freiné le rythme de son expansion. L'industrie dispose maintenant d'une capacité d'environ 3 millions de kilowatts, avec une production annuelle d'énergie de 10 milliards de kilowattheures. La consommation annuelle d'électricité par habitant est seulement de 20 kWh environ.

Parmi les diverses provinces, c'est à Formose que la production de l'énergie électrique s'est le plus vite développée; la puissance installée s'élève au total à 450 000 kW et la production annuelle d'énergie électrique est de 2 milliards de kilowattheures. Le réseau de transport et de distribution de l'île est suffisant et 75 pour cent de l'électricité produite est consommée par l'industrie; la consommation annuelle moyenne par habitant est de 210 kWh.

Viennent ensuite sur le continent les provinces du Nord-Est (Mandchourie) et les provinces côtières. A l'intérieur du pays, il n'existe pas de réseau électrique, sauf pour l'éclairage des capitales de provinces et de quelques grandes villes.

La production de l'énergie électrique en Chine n'a jamais dépassé le premier stade de son développement et il est indispensable d'en accroître l'importance pour mettre à exécution le programme d'expansion économique du pays.

Avant d'étudier le plan du développement futur de la production de l'énergie électrique en Chine, il faut commencer par évaluer quelle sera la demande d'énergie au cours des cinquante années à venir. Pour tenir dûment compte des effets du niveau de vie et du degré d'industrialisation sur la demande d'énergie, nous avons, pour cette évaluation, divisé la Chine en six régions d'après leurs ressources naturelles respectives, le niveau de vie et l'activité industrielle et commerciale de chacune d'elles. Ces régions sont : 1) Formose; 2) les provinces du Nord-Est; 3) les huit villes métropolitaines; 4) les provinces du Nord, du Centre et du Sud; 5) les provinces du Sud-Ouest; et 6) les provinces frontières.

On trouvera au tableau 1 une estimation de la demande d'énergie dans chacune de ces six régions pendant les cinquante années à venir.

Une étude détaillée pour la région de Formose montre qu'au cours des dix prochaines années, la consommation annuelle d'électricité par habitant atteindra 560 kWh, ce qui est très proche du chiffre actuellement enregistré au Japon. Si l'on met ce chiffre en regard des tendances récentes du développement économique de Formose, on trouve que cette évaluation n'est nullement exagérée. On a estimé le taux d'accroissement de la demande d'énergie au bout des dix premières années à 6 pour cent par an, chiffre qui semble lui aussi devoir être plutôt en dessous de la réalité.

Pour les provinces du Nord-Est qui disposent de ressources naturelles abondantes, dont l'activité industrielle et commerciale est très développée, et qui possèdent le réseau d'énergie le plus grand de Chine, on a considéré que l'expansion se ferait au même rythme qu'à Formose.

Pour les autres régions, l'étude s'est faite par comparaison avec le cas de Formose et des provinces du Nord-Est, compte tenu de la population, des ressources, des moyens de communication, de l'activité industrielle et commerciale de chacune d'elles; on a de plus admis que leur développement atteindrait le niveau actuel de celui de Formose dans vingt-cinq ans.

Comme l'indique le tableau 1, pour faire face aux besoins d'une population plus nombreuse et pour relever son niveau de vie, la demande d'électricité atteindra, dans cinquante ans, 226 millions

---

Original : anglais.

* Vice-président et ingénieur en chef de la Société de l'énergie de Formose, Taïpeh, Formose, Chine.

Tableau 1

Demande d'énergie électrique en Chine au cours des cinquante prochaines années

Région	Puissance installée (estimation en MW)					Production annuelle d'énergie (en millions de kWh)				
	Fin de la 10e année	Fin de la 20e année	Fin de la 30e année	Fin de la 40e année	Fin de la 50e année	Fin de la 10e année	Fin de la 20e année	Fin de la 30e année	Fin de la 40e année	Fin de la 50e année
I. Formose	1 300	2 100	3 500	6 300	11 600	5 600	9 600	15 000	27 300	50 000
II. Provinces du Nord-Est . . .	4 080	8 200	16 000	31 100	61 000	17 600	36 000	69 300	135 000	263 000
III. Huit grandes villes	1 160	2 200	3 900	7 700	14 500	4 500	8 600	15 300	30 000	57 000
IV. Provinces du Nord, du Centre et du Sud . . .	2 850	9 900	28 300	61 000	111 200	9 750	34 000	97 000	213 000	390 000
V. Provinces du Sud-Ouest	580	1 710	6 000	14 800	25 000	1 500	4 620	15 400	38 500	65 300
VI. Provinces frontières	30	90	500	1 500	2 700	50	160	870	2 560	4 700
TOTAL	10 000	24 200	58 200	122 400	226 000	39 000	92 980	212 870	446 360	830 000

Région	Consommation annuelle moyenne par habitant (en kWh)				
	Fin de la 10e année	Fin de la 20e année	Fin de la 30e année	Fin de la 40e année	Fin de la 50e année
I. Formose	560	750	1 200	2 100	3 800
II. Provinces du Nord-Est	400	600	1 050	1 900	3 500
III. Huit grandes villes	300	500	950	1 600	3 000
IV. Provinces du Nord, du Centre et du Sud	30	100	275	600	1 100
V. Provinces du Sud-Ouest	20	60	200	500	850
VI. Provinces frontières	10	30	150	400	670
Consommation annuelle moyenne par habitant pour l'ensemble du pays	80	176	400	820	1 500

de kilowatts au minimum, avec une production annuelle de 830 milliards de kilowattheures. La consommation annuelle moyenne par habitant sera alors de 1 500 kWh, ce qui est encore bien inférieur à la consommation d'autres pays plus industrialisés.

RÉPARTITION DES RÉSERVES D'ÉNERGIE DE LA CHINE

La Chine a d'abondantes réserves de charbon et d'énergie hydraulique.

Les réserves totales de charbon sont estimées à 309 613 200 000 tonnes, dont 82,5 pour cent de charbon gras; les gisements se trouvent sur tout le territoire du pays, mais 77 pour cent sont dans les régions de Chan-si et de Chen-si, avec des quantités moins importantes dans le Ho-nan et les provinces du Nord.

Les principales mines exploitées jusqu'ici se trouvent dans les régions du Nord et du Nord-Est, où la production a atteint un maximum de 57 millions de tonnes par an, soit 85 pour cent de la production totale de la Chine. Formose a des réserves de charbon estimées à 215 millions de tonnes, dont 100 millions ont été extraites au cours des quatre-vingt dernières années. Les principaux bassins sont dans la partie nord de l'île, dans les régions proches des villes de Taïpeh et Kéloung. La production actuelle se chiffre à 2 400 000 tonnes par an.

Les premières enquêtes montrent que la Chine possède, en ressources hydroélectriques, un potentiel de 137 000 000 de kW, dont la majeure partie se trouve dans les régions du Sud-Ouest et de l'Ouest. La région limitrophe des provinces du Si-Kiang, du Yunnan et du Sseu-Tchouan, avec un terrain favorable et une abondance de ressources qu'il est facile

de mettre en valeur à peu de frais, offre le plus de possibilités. Toutefois, comme cette région se trouve éloignée des centres de consommation possibles, on ne pourra pas utiliser complètement ces ressources dans un avenir rapproché.

Les deux principaux fleuves de la Chine, le Yang-tsé-kiang et le Hoang-ho, traversent des gorges étroites avant de parvenir à la plaine; il existe donc des emplacements qui se prêtent excellemment à la réalisation de programmes hydrauliques à diverses fins. L'aménagement des gorges du Yang-tsé-kiang près de la ville de I-tchang, avec un potentiel de 10 560 000 kW, et celui des gorges du Hoang-ho aux limites des provinces du Chan-si, du Chen-si et du Ho-nan, avec un potentiel de 7 709 000 kW, sont des projets réalisables. Outre les avantages que l'on pourrait retirer de ces travaux pour la lutte contre les inondations, pour l'irrigation et pour la navigation, la situation géographique centrale de ces barrages permettrait de transporter économiquement l'énergie produite sur des lignes à très haute tension jusqu'aux centres de consommation des régions côtières et des grandes villes. La valeur économique de ces deux projets est donc beaucoup plus grande que celle de projets qui intéresseraient des régions situées plus en amont sur ces fleuves.

L'île de Formose, avec ses chaînes de montagnes abruptes, ses rivières rapides et ses pluies abondantes, se prête à la production d'énergie hydroélectrique. Le potentiel total s'élève à 3 millions de kilowatts, ce qui représente 84 kW au kilomètre carré. Les centrales hydrauliques actuellement en service ou en construction ont une puissance de 398 000 kW. Toutefois, les formations géologiques médiocres et les faibles dimensions des usines qu'il est possible d'installer font que les frais de construction sont relativement élevés; la configuration du terrain limitant le nombre des emplacements convenables pour les réservoirs d'accumulation, il faut compléter la production par des centrales thermiques au cours des saisons sèches, si bien que le coût de l'énergie est élevé. A l'heure actuelle, le coût de construction des centrales hydrauliques est en moyenne de 430 dollars des États-Unis par kilowatt installé et le prix de revient de l'électricité est de 0,007 dollar par kilowattheure.

Le tableau 2 donne la répartition des ressources potentielles de charbon et d'énergie hydraulique en Chine. On constatera que ces ressources sont importantes et assez bien réparties. On peut dire toutefois qu'en général les ressources charbonnières sont concentrées dans le nord de la Chine et les ressources hydrauliques dans l'ouest et le sud-ouest du pays.

Selon les enquêtes préliminaires, il existe des gîtes d'uranium dans les régions nord-ouest, nord-est et sud-est de la Chine. Des mines de monazite, dont on peut extraire du thorium, ont été découvertes à Formose. La quantité de monazite est estimée à environ 8 800 tonnes.

Tableau 2

Réserves de charbon et ressources hydroélectriques de la Chine

Région	Réserves de charbon (en millions de tonnes)	Ressources hydroélectriques (en kW)
I. Formose	215	3 000 000
II. Provinces du Nord-Est	4 410,1	6 000 000
III. Huit grandes villes .	—	—
IV. Provinces du Nord, du Centre et du Sud. .	220 180,9	47 300 000
V. Provinces du Sud-Ouest	82 945,2	23 700 000
VI. Provinces frontières .	1 862	57 000 000
TOTAL	309 613,2	137 000 000

POSSIBILITÉS FUTURES DE L'EMPLOI DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE DANS LES PAYS INDUSTRIELLEMENT SOUS-DÉVELOPPÉS

Il est peut-être encore trop tôt pour prédire avec exactitude toutes les conséquences que l'utilisation de l'énergie nucléaire en vue de la production d'électricité aura sur l'ensemble de l'industrie. On s'accorde cependant à reconnaître qu'il y aura des répercussions importantes sur l'industrie électrique elle-même. On peut aisément supposer que les recherches, les progrès et l'expérience permettront dans un proche avenir de résoudre les problèmes et les difficultés techniques et économiques que soulève actuellement l'emploi industriel de l'énergie nucléaire. Cette utilisation ne donnera pas seulement au monde une nouvelle source d'énergie aux possibilités extraordinaires; ce qui importe davantage c'est que les nations qui manquent de ressources naturelles reprendront courage car elles auront l'assurance de disposer, pour le développement de leur économie, d'énergie électrique à bon marché malgré le handicap des moyens de communication et des conditions naturelles.

D'une manière générale, les caractéristiques particulières de l'énergie électronucléaire au stade actuel de son développement sont les suivantes :

a) On peut prévoir que les frais de construction diminueront progressivement à mesure que la conception des usines deviendra plus simple et que la production augmentera. Toutefois, il n'est guère à prévoir que les frais de construction d'une centrale nucléaire deviennent plus faibles que ceux d'une centrale thermique de type classique de dimensions comparables. On estime que dans vingt ans, les frais de construction d'une centrale nucléaire en Chine ne seront pas inférieurs à 200 ou 300 dollars par kilowattheure, le prix du combustible ne dépassant pas 0,0015 dollar par kilowattheure et le prix de revient total étant de l'ordre de 0,005 dollar par kilowattheure.

b) En raison du faible poids du combustible utilisé dans une centrale nucléaire, la question du transport du combustible n'influera aucunement sur le choix des emplacements et les centrales seront en général installées dans les centres de consommation ou à proximité de ceux-ci, les seules considérations étant celles de l'eau de refroidissement, de l'élimination des déchets et du réseau d'interconnexion. Dans un pays où les frais fixes, tels que l'intérêt du capital et l'amortissement, sont uniformes, le prix de revient de l'électricité d'origine nucléaire sera uniforme sur l'ensemble du territoire, quels que soient l'emplacement des centrales et les moyens de transport du combustible.

c) L'énergie électronucléaire, de par sa nature, se situe entre l'énergie thermique usuelle et l'énergie hydraulique; elle présente donc les avantages que l'on peut attribuer à ces deux formes de l'énergie. Pour des raisons d'économie dans la construction, la puissance des centrales nucléaires ne sera pas inférieure à 100 000 ou 200 000 kW. Ces centrales serviront de centrales de base et leur production sera complétée par d'autres centrales de type classique, pour lesquelles les dépenses en capital sont moindres mais les frais d'exploitation plus élevés, et qui fourniront la charge de pointe.

Dans les pays dont les ressources en énergie sont abondantes et dont l'industrie est très développée, c'est le prix de revient de l'énergie nucléaire qui fixera la limite économique supérieure du développement de la production d'énergie thermique ou hydraulique de type classique. Jusqu'à ce jour, on a surtout exploité les sources les plus économiques de charbon et d'énergie hydraulique; on s'attend donc à ce que l'énergie électronucléaire remplace progressivement ces formes d'énergie dans l'avenir.

Dans les pays dont les ressources en énergie sont abondantes mais dont l'industrie est insuffisamment développée, l'énergie électronucléaire entrera, là aussi, en concurrence avec l'énergie thermique ou hydraulique de type classique. Toutefois, dans ce cas, les conditions sociales et économiques diffèrent de ce qu'elles sont dans les pays très développés, et les modalités de la mise en valeur de l'énergie nucléaire seront différentes. Dans ces pays, le problème des investissements devient une considération très importante pour tout grand programme de relèvement économique. Ce problème se pose de façon particulièrement aiguë, lorsqu'il s'agit de la production de l'énergie électrique où les investissements en capital sont élevés et les bénéfices d'exploitation relativement faibles. Lorsque l'on met au point des programmes de mise en valeur de l'énergie, il se peut donc que des investissements initiaux faibles pèsent davantage dans la balance qu'un coût de production peu élevé.

Pendant le premier stade de la mise en application d'un programme de développement de la production d'énergie, où l'on peut avoir besoin de centres de production relativement peu importants et isolés, c'est la centrale thermique de type classique, dont les dépenses en capital sont plus faibles, qui sera peut-être la solution la plus indiquée. De même, bien que les investissements par kilowatt installé puissent être plus élevés pour les petites et moyennes centrales hydrauliques que pour une centrale nucléaire, des centrales hydrauliques pourront être plus avantageuses si les distances auxquelles doit être transportée l'énergie ne sont pas excessives; en effet, la plus grande partie des investissements initiaux portent sur une main-d'œuvre et des matières premières que l'on peut se procurer sur place. En conséquence, dans un pays disposant d'abondantes ressources en énergie mais dont l'industrie est peu développée, la conjugaison des frais élevés, de la pénurie de capitaux et de la dispersion des centres de consommation aura pour effet, au début du développement économique, de favoriser la construction de centrales thermiques classiques ou de centrales hydrauliques petites ou moyennes de prix relativement faible, au détriment des centrales nucléaires.

Dans la deuxième étape, les capitaux plus nombreux, l'industrialisation progressive, la centralisation des lieux de consommation et la réduction des dépenses de construction des centrales nucléaires créeront une compétition entre les grandes centrales nucléaires et les installations hydroélectriques, qui offrent d'autres avantages en ce sens qu'elles ont une répercussion sur l'irrigation, la lutte contre les inondations et la navigabilité des fleuves. Bien que les frais de construction des centrales nucléaires puissent être plus élevés que ceux des centrales thermiques de type classique, le total des investissements que le pays doit prendre à sa charge peut l'incliner à préférer les centrales nucléaires, qui ne requièrent aucun moyen de transport pour le combustible. L'énergie thermique classique ne sera donc utilisée que sur le carreau des mines, pour donner un débouché aux charbons de qualité inférieure. Pendant cette période, ce sont les frais d'investissement et d'exploitation du réseau de transport d'énergie qui constitueront le facteur primordial qui déterminera la forme d'énergie à exploiter. Bien que les progrès dans la technique du transport de l'énergie aient été très rapides, les frais de transport et de transformation sur un rayon de 300 km représentent 0,001 à 0,003 dollar par kilowatt, selon la quantité d'énergie transmise et le facteur de charge. Les frais de construction sont de l'ordre de 50 à 80 dollars par kilovoltampère. Ceci est un grand avantage en faveur de l'énergie électronucléaire qui peut être produite au centre même de consommation sans frais supplémentaires.

Une fois que l'industrie se sera développée, que les centres de consommation se seront groupés et que les divers programmes d'aménagement possibles de centrales hydrauliques à fins multiples auront été réalisés, l'énergie nucléaire deviendra la principale source d'électricité; les autres sources d'énergie prendront une importance secondaire et ne seront exploitées que là où elles peuvent présenter un avantage particulier ou pour assurer la charge de pointe.

PRÉVISION DU DÉVELOPPEMENT DE LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ EN CHINE AU COURS DES CINQUANTE ANNÉES A VENIR

A l'exception de Formose, des provinces du Nord-Est et de quelques-unes des villes principales qui possèdent un réseau moderne et une industrie un peu développée, l'électricité est produite en Chine, à l'heure actuelle, dans de petites centrales dispersées, principalement utilisées pour l'éclairage.

Au stade initial du relèvement économique, pendant les dix premières années, la demande sera encore faible et le réseau de production et de distribution ne sera pas achevé. Ces considérations, jointes à la pénurie de capitaux, obligeront la Chine à recourir à l'énergie thermique classique, complétée par la production de moyennes ou petites centrales hydrauliques construites aux moindres frais. Il est toutefois permis de croire que l'on construira, dès cette époque, des centrales nucléaires, dans les régions industrialisées de Formose et des provinces du Nord-Est.

Pendant la deuxième décennie, le réseau d'énergie électrique continuera à s'étendre. Les projets à fins multiples réalisés le long du Yang-tsé-kiang et du Hoang-ho seront pratiquement achevés, et les grandes centrales thermiques se rassembleront petit à petit autour des régions du Nord et du Nord-Est, où le combustible est particulièrement bon marché. La fourniture d'électricité aux grandes villes industrielles sera de plus en plus assurée par des centrales nucléaires.

Au cours de la troisième décennie, on enregistrera une augmentation importante de la production d'énergie hydraulique, car de grands projets d'aménagement hydroélectriques à fins multiples, dont la construction avait été commencée dans les périodes précédentes, seront successivement menés à bien. L'énergie nucléaire viendra ensuite et l'énergie thermique sera tombée au troisième rang. Avec un réseau électrique bien développé, l'utilisation coordonnée des diverses sources d'énergie sera de première importance.

A partir de la quatrième décennie, on construira de nombreuses centrales nucléaires aux centres de consommation. La construction de centrales hydrauliques se fera surtout dans les régions du Sud-Ouest et de l'Ouest, abondantes en ressources hydrauliques. On construira également des centrales hydrauliques aux centres de consommation en Chine centrale et le long des régions côtières pour fournir les charges de pointe et compléter l'exploitation des centrales nucléaires qui fourniront la charge de base. De grandes centrales thermiques, destinées à compléter la production pendant les saisons sèches, seront encore construites dans les régions de la Chine du Nord et du Nord-Est où le combustible est bon marché. Les centrales thermiques de plus faible rendement seront progressivement affectées aux charges de pointe, afin de compléter les centrales nucléaires.

Dans la province de Formose, la puissance totale installée ou en cours d'installation s'élève à 540 000 kW, dont 398 000 kW d'origine hydraulique et 142 000 kW d'origine thermique. Le prix de revient moyen du kilowattheure aux barres de distribution d'une centrale hydraulique est de 0,007 dollar. L'énergie thermique, qui complète la capacité de production des centrales hydrauliques pendant les périodes de sécheresse, est produite avec un facteur de charge moyen de 50 pour cent, au prix de revient de 0,013 dollar par kilowattheure. Au cours des dix prochaines années, en raison des besoins de la lutte contre les inondations et de l'irrigation, l'usine de Chih-men sera achevée et l'on mettra en route l'exécution du projet de mise en valeur du fleuve Ta-tchia. Pour ces deux grands ouvrages, on prévoit la construction de réservoirs à fins multiples qui sont rares à Formose; une fois achevés, ils augmenteront de 500 000 kW la capacité de l'île. Afin de faire face aux pénuries pendant les saisons sèches, on installera en même temps 300 000 kW de puissance thermique pendant cette période.

A cause des caractéristiques défavorables du terrain et des cours d'eau, et de l'exiguïté des veines de charbon, le coût de production de l'énergie hydroélectrique ainsi que de l'énergie thermique est élevé à Formose; aussi l'énergie nucléaire se trouve-t-elle en très bonne position. La mise en valeur de l'énergie nucléaire commencera donc dans les dix années à venir. A partir de la seconde période décennale, l'énergie électronucléaire remplacera l'énergie thermique de type classique. Elle deviendra la principale source d'énergie à partir de la troisième décennie, époque à laquelle les centrales hydrauliques nouvellement construites seront surtout destinées à assurer la charge de pointe. On s'attend qu'au cours des cinquante années à venir tous les sites dont l'aménagement hydraulique est économiquement intéressant soient mis en valeur dans l'île.

A la fin de la cinquième décennie, on estime que l'industrie électrique disposera dans l'île de Formose d'une puissance totale de 11 600 000 kW, dont 8 700 000 kW seront d'origine nucléaire, 500 000 kW d'origine thermique et 2 400 000 kW d'origine hydraulique. La consommation annuelle moyenne par habitant atteindra alors 3 800 kWh.

On trouvera au tableau 3 les prévisions concernant le développement de la production de l'énergie électrique en Chine au cours des cinquante années à venir.

Tableau 3

Développement de la production d'énergie électrique en Chine au cours des cinquante prochaines années

Région	Origine	Puissance installée totale (en MW) Fin de la 10e année	Fin de la 20e année	Fin de la 30e année	Fin de la 40e année	Fin de la 50e année
I. Formose . . .	Hydraulique	700	1 100	1 400	1 800	2 400
	Thermique .	500	500	500	500	500
	Nucléaire . .	100	500	1 600	4 000	8 700
	Total partiel	1 300	2 100	3 500	6 300	11 600
II. Provinces du Nord-Est	Hydraulique	1 280	2 400	3 600	4 800	4 800
	Thermique .	2 600	4 100	6 200	6 200	6 200
	Nucléaire . .	200	1 700	6 200	20 100	50 000
	Total partiel.	4 080	8 200	16 000	31 100	61 000
III. Huit grandes villes	Hydraulique	—	—	—	—	—
	Thermique .	1 160	1 400	1 400	1 400	1 400
	Nucléaire . .	—	800	2 500	6 300	13 100
	Total partiel.	1 160	2 200	3 900	7 700	14 500
IV. Provinces du Nord, du Centre et du Sud	Hydraulique	650	5 500	15 900	24 000	34 100
	Thermique .	2 200	3 600	5 600	14 800	14 800
	Nucléaire . .	—	800	6 800	22 200	62 300
	Total partiel.	2 850	9 900	28 300	61 000	111 200
V. Provinces du Sud-Ouest	Hydraulique	180	510	2 800	7 800	13 000
	Thermique .	400	1 000	2 000	3 000	3 000
	Nucléaire . .	—	200	1 200	4 000	9 000
	Total partiel.	580	1 710	6 000	14 800	25 000
VI. Provinces frontières	Hydraulique	20	60	400	1 200	2 100
	Thermique .	10	30	100	300	300
	Nucléaire . .	—	—	—	—	300
	Total partiel.	30	90	500	1 500	2 700
TOTAL . . .	Hydraulique	2 830	9 570	24 100	39 600	56 400
	Thermique .	6 870	10 630	15 800	26 200	26 200
	Nucléaire . .	300	4 000	18 300	56 600	143 400
	Total général	10 000	24 200	58 200	122 400	226 000

Besoins de la République d'Égypte en énergie électrique et thermique

par M. A. B. El-Koshairy et I. H. Abdel-Rahman *

Généralités

On ne peut prévoir qu'approximativement l'étendue des besoins de la République d'Égypte en énergie électrique et thermique pendant la période qui s'étend de 1955 à 1975, car le rythme auquel évoluent les multiples facteurs qui déterminent ces besoins est très incertain et inégal. Il serait plus aléatoire encore de prédire l'importance de ces besoins après 1975, jusqu'à l'an 2000 par exemple, puisque l'on s'attend que la situation sociale et économique de l'Égypte se modifie profondément au cours des vingt prochaines années.

Dans la présente communication, nous donnons une estimation de la production actuelle et future d'énergie, ainsi que du volume des ressources hydro-électriques, en interprétant avec toute l'exactitude possible les données et les statistiques dont nous disposons.

Nous donnons également des estimations du coût de production de l'énergie dans les centrales thermiques existantes, du coût probable de production dans les centrales hydrauliques qui seront construites, et du coût probable de la transmission d'énergie des centrales hydrauliques aux centres de consommation.

Nous comparons ensuite ces coûts aux estimations des coûts de production d'énergie dans les centrales électronucléaires qui ont été publiées dans le *Livre blanc* du Gouvernement du Royaume-Uni. Nous examinons pour terminer dans quelle mesure la production d'énergie électronucléaire pourrait se justifier en Égypte.

Les besoins de l'Égypte en énergie électrique et thermique (1955)

On trouvera au tableau 1 le bilan de la demande d'énergie électrique et thermique pour l'ensemble de l'Égypte.

Tableau 1

Demande d'énergie électrique et thermique en Égypte

(En milliards de kWh)

A. Production d'électricité	1,5
B. Moteurs fixes	1,5
C. Industries lourdes	0,0
D. Transports	2,5
E. Consommation des ménages dans les zones urbaines	2,0
F. Consommation des ménages dans les zones rurales	4,0
TOTAL	11,5

Principaux combustibles consommés

Abstraction faite de la très faible production des centrales hydrauliques (8 millions de kWh), l'Égypte est entièrement tributaire des produits pétroliers pour faire face à l'ensemble de ses besoins en énergie; la lumière et la chaleur sont produites au moyen des combustibles pétroliers et des déchets des récoltes (coton, maïs, blé, riz, lin, etc.) qui, dans les zones rurales, servent principalement à la consommation des ménages d'agriculteurs. En outre, les raffineries de sucre se servent des déchets de canne à sucre pour produire la vapeur nécessaire aux diverses opérations de raffinage et à la production d'électricité.

Il apparaît donc clairement que c'est le pétrole qui est actuellement le principal combustible de l'Égypte, et il convient d'étudier la tendance de la consommation de ses différents composés.

Le tableau 2 porte sur la consommation des produits pétroliers entre 1937 et 1954.

On remarquera que pendant les années de guerre (1940-1945) les chemins de fer nationaux égyptiens ont abandonné le charbon, et converti leurs locomotives à la chauffe au pétrole; c'est la raison pour laquelle la consommation a brusquement augmenté entre 1940 et 1945. D'autre part, la population du pays s'est accrue d'environ 5 millions d'habitants.

La valeur calorifique totale correspondant à la consommation de pétrole a doublé entre 1937 et 1954, au cours de périodes variant entre sept et douze ans.

Original : anglais.

* En collaboration avec le Bureau technique de la Commission égyptienne de l'électricité, sous le contrôle du Conseil permanent pour le développement de la production nationale.

Tableau 2

Consommation de produits pétroliers

(En milliers de tonnes métriques)

Année	Gazoline avion	Essence	Pétrole lampant	Carburant diesel	Gas-oil	Fuel-oil	Total
1954 .	40	237	755	189	125	1 788	3 134
1953 .	40	242	729	206	118	1 638	2 973
1952 .	40	278	510	260	160	1 500	2 748
1951 .	37	262	500	260	155	1 500	2 714
1950 .	34	252	480	250	150	1 500	2 666
1949 .	31	232	450	240	140	1 400	2 493
1948 .	28	212	440	230	130	1 300	2 340
1947 .	19	200	414	219	124	1 219	2 195
1946 .	14	166	387	202	109	1 105	1 983
1945 .	8	130	358	205	99	1 086	1 885
1944 .	4	110	319	197	67	1 004	1 701
1943 .	3	107	297	189	43	851	1 490
1942 .	3	106	262	183	37	536	1 127
1941 .	2	96	245	184	34	381	942
1940 .	3	89	270	190	40	197	789
1939 .	5	93	311	198	36	84	727
1938 .	3,5	85	311	190	33	45	667,5
1937 .	2,5	80	304	180	28	36	630,5

On trouve au tableau 3 la répartition en pourcentage, selon leur utilisation, des produits pétroliers consommés en 1954.

Les chiffres du tableau 3 permettront d'étudier plus facilement l'évolution future de la consommation dans ses rapports avec le développement économique et social du pays.

Tableau 3

Répartition, en pourcentage, de la consommation de produits pétroliers (1954)

	Fuel-oil	Gas-oil diesel	Pétrole lampant	Essence
Agriculture	5	40	13	—
Industrie	46	29	19	—
Transports	32	11	—	100
Services publics . .	17	20	—	—
Ménages	—	—	68	—

Une partie du combustible consommé est produite dans le pays, le reste étant importé soit à l'état brut, soit sous forme de produits terminaux.

Le tableau 4 exprime, en pourcentage, la part de chacun des produits dans le total des importations :

Tableau 4

Fuel-oil	28 pour cent
Gas-oil diesel	78 pour cent
Pétrole lampant	81 pour cent
Essence	31 pour cent

Réseaux électriques existants

On produit actuellement l'électricité dans d'innombrables petites centrales indépendantes, dont la capacité installée varie de 100 kW pour les petites centrales diesel exploitées par les municipalités, à 100 MW pour la centrale du Caire-Nord qui appartient à la Direction de l'électricité et du gaz de la ville du Caire.

La charge de pointe totale en 1954 a été enregistrée le 22 décembre; elle s'est élevée à 250 MW; et le total de l'énergie produite a atteint 1 309 millions de kWh, qui se sont répartis entre les diverses branches d'activités de la façon indiquée dans le tableau 5.

Tableau 5

Production d'électricité en 1954

(En millions de kWh)

Services publics[a]	711,44
Irrigation	34,000
Drainage	52,000
Industries textiles	158,070
Papeteries	7,077
Sucreries	35,447
Cimenteries	85,252
Egrenage du coton	0,994
Engrais	89,709
Savon et huile	14,160
Raffineries de pétrole . . .	18,310
Divers	103,387
TOTAL	1 309,846

[a] Y compris quelques établissements industriels du Caire et d'Alexandrie.

La capacité installée des divers types de centrales atteint au total :

Centrales thermiques à vapeur	428,5 MW
Centrales diesel	114 MW
Centrales hydrauliques . . .	6 MW

Les responsables de l'électrification future de l'Égypte envisagent d'établir une interconnexion entre les différentes centrales de façon que le réseau électrique couvre l'ensemble du pays. Dans l'état actuel des choses, les centrales sont dispersées et, dans la plupart des cas, elles ne sont pas connectées.

Moteurs fixes

La puissance installée des moteurs fixes à embrayage direct qui sont disséminés dans le pays, et sont pour la plupart des moteurs diesel, s'élève au total à 750 000 CV, puissance à peu près égale à celle des centrales électriques. Le rôle important joué par ces moteurs est une caractéristique des pays insuffisamment développés qui n'ont pas encore établi de réseau électrique général.

Il est probable que la plupart des usagers cesseront d'utiliser ces moteurs pour s'adresser aux réseaux là où il en existera.

On estime qu'en 1965, 50 pour cent de la force motrice actuellement tirée de sources mécaniques sera remplacée par la force électrique, et qu'en 1975, le nombre et la puissance des installations mécaniques auront considérablement baissé. Elles ne disparaîtront pas complètement, car elles auront toujours leur utilisation dans les régions rurales où les centres de consommation sont trop éloignés des réseaux de distribution pour que la force électrique soit rentable.

Production d'énergie électrique par habitant

Étant donné que l'Égypte comptait plus de 22 millions d'habitants en 1954, les chiffres du tableau 5 permettent de calculer que la production annuelle d'énergie électrique par habitant est de 60 kWh. Ce chiffre est extrêmement bas, même si l'on y ajoute celui de l'énergie produite par des moyens mécaniques. En 1952, la moyenne correspondante pour le monde a été de 570 kWh par habitant.

Le faible niveau de cette production s'explique par le prix de revient de l'énergie électrique, qui est relativement élevé par rapport à celui de la main d'œuvre. La situation se modifie rapidement. A la suite des récents événements politiques et sociaux, la main-d'œuvre est devenue plus chère et moins abondante; la réalisation de programmes nationaux d'électrification mieux conçus, comportant la mise en valeur de l'énergie hydroélectrique, aura certainement pour effet d'abaisser le coût de la production d'électricité. Il en résultera une accélération du rythme auquel la production d'électricité augmente pour faire face à une demande croissante. Toutefois, pour ne pas pécher par excès d'optimisme, on a commencé par déterminer le taux d'expansion des années immédiatement précédentes, et l'on a admis qu'il se maintiendrait pendant les dix prochaines années, pour faiblir ensuite au cours de la décennie suivante. Puisque notre étude porte en premier lieu sur la production d'énergie électrique par habitant dans les principales agglomérations urbaines et les municipalités, nous avons indiqué au tableau 6 leur population et la quantité d'énergie produite par habitant.

Tableau 6

Production d'énergie par habitant dans les grandes agglomérations urbaines et les municipalités

Ville	Population (en milliers d'habitants)	kWh par habitant
Le Caire	2 650	202
Alexandrie	1 130	240
Port-Saïd	210	82
Ismaïlia	86	80
Tantah	160	54
Damanhour	99	41
Miniah	84	42
Assiout	108	35

On constatera une nette différence entre les villes : d'une part, les deux grandes agglomérations que sont Le Caire et Alexandrie, où les éléments de confort et la production industrielle expliquent les chiffres élevés de la consommation, et d'autre part, les villes de province, où les chiffres sont inférieurs à la moyenne générale du pays. Les chiffres intermédiaires donnés pour Ismaïlia et Port-Saïd sont caractéristiques d'un état de développement intermédiaire entre ces deux extrêmes.

Dans les agglomérations et les villes, la population s'accroît à un taux supérieur à celui de l'ensemble du pays en raison de l'exode rural. Les gens s'y adaptent plus rapidement aux modes de vie modernes, et les industries s'implantent de préférence dans les zones déjà industrialisées. Tous ces facteurs nous amènent à conclure que le taux d'accroissement de la production d'énergie est proportionnel au niveau actuel de la consommation et à l'importance de la collectivité.

L'étude détaillée des charges de pointe et de la quantité d'énergie totale produite dans diverses villes d'importance variable a montré que la période pendant laquelle la production d'électricité a doublé de volume, a varié entre 6 et 20 ans, pour quatre groupes de collectivités.

Tableau 7

Période nécessaire aux services publics pour doubler leur production d'électricité

	Période
Le Caire, Alexandrie, Tantah, Port-Saïd	6 à 7 ans
Villes de moyenne importance	
Assiout, Damiette	8 à 9 ans
Petites villes	
Mit-Ghamr, Guirga	10 à 11 ans
Très petites villes	
Beba, Sahel Selim, Bush	12 à 20 ans

Toutefois, pour calculer les besoins futurs en énergie, nous avons supposé que la production des centrales exploitées par les services publics doubleraient au cours d'une période plus longue, comme il ressort du tableau 8.

Cinq millions d'habitants bénéficient actuellement de la distribution d'électricité, encore que tous n'en fassent pas effectivement usage. On peut considérer que tout le reste de la population, soit 17 millions d'habitants, vit dans des régions entièrement rurales

Tableau 8

Nombre d'années nécessaires aux centrales alimentant des services publics pour doubler leur production

Période	Grands centres	Villes de moyenne importance	Districts ruraux
1954-1965 . . .	7	8	10
1965-1975 . . .	10	11	12
1975-2000 . . .	12,5	12,5	12,5

dépourvues de toute fourniture d'électricité. L'augmentation future de la consommation d'électricité dans les villes sera déterminée par deux facteurs complémentaires : le nombre plus élevé de ceux qui choisiront l'électricité comme source d'énergie, de préférence aux combustibles liquides, et la quantité accrue d'électricité qu'utiliseront les abonnés actuels.

La population rurale

Dans l'avenir, les besoins des régions rurales en énergie entraîneront l'adduction de courant aux villes et collectivités de faible importance; il y a là une autre forme d'urbanisation qui vient s'ajouter à l'exode rural, dont il a été question ci-dessus. En outre, l'aménagement envisagé du réseau électrique national permettra au consommateur de s'approvisionner plus facilement en électricité qui sera littéralement à portée de la main dans de nombreux districts. On estime toutefois que le paysan qui actuellement brûle des produits agricoles pour obtenir de la chaleur, fera appel en premier lieu aux combustibles liquides avant de s'habituer à l'électricité. L'énergie mécanique prendrait elle aussi plus d'importance, ce qui entraînerait la consommation de combustibles liquides.

On a admis qu'en 1965 la consommation annuelle moyenne par habitant sera de 10 kWh, et qu'elle doublera en l'espace de dix à douze ans. Cette estimation est modeste, eu égard notamment aux grands projets d'éducation des masses et d'aménagement des campagnes qui sont en cours d'exécution.

Besoins des systèmes publics d'irrigation et de drainage

Le système d'irrigation de l'Égypte est fondé sur le pompage de l'eau qui doit être amenée jusqu'aux points plus élevés; il faut également disposer d'un certains nombre de stations de pompage pour élever l'eau des longs canaux de drainage au niveau des lacs septentrionaux, d'où elle se déverse dans la mer. En 1954, les stations de pompage exploitées par le Département égyptien de la mécanique et de l'électricité développaient au total 73 millions de kWh.

Les programmes de mise en valeur des terres actuellement en cours, et ceux qui seront mis en chantier dès l'achèvement du grand barrage d'Assouan, porteront sur plus de 2 millions de feddans (1 feddan = 4 200 mètres carrés) de terres, situées pour la plupart de part et d'autre du delta du Nil. Pour irriguer ces terres, il faudra pomper l'eau à une hauteur variant de 5 à 30 mètres, et développer en conséquence le réseau de drainage.

Les quantités d'énergie électrique nécessaires à ces travaux sont évaluées à :

650 millions de kWh pour 1965
1 070 millions de kWh pour 1975
2 000 millions de kWh pour l'an 2000

Production autonome d'électricité nécessaire à l'industrie

Aucun service national de fourniture d'électricité n'ayant été mis sur pied jusqu'ici, de nombreux établissements industriels possèdent leur propre centrale; 360 millions de kWh ont été ainsi produits en 1953. On s'attend que l'activité de ces industries double tous les dix ans, à l'exception de l'industrie du sucre qui restera stationnaire après 1965.

Électrification des chemins de fer

Si la densité du trafic reste la même qu'actuellement, il faudra produire environ 500 millions de kWh pour électrifier les chemins de fer de la République.

Si l'on admet que l'électrification sera achevée en 1975, et que le trafic doublera en vingt ans, il faudra disposer d'environ 1 milliard de kWh en 1975. On estime qu'en 1965 les besoins en énergie seront de l'ordre de 300 millions de kWh.

Fabrique d'engrais et usine sidérurgique

On prévoit qu'en 1960 la fabrique d'engrais d'Assouan consommera 1 400 millions de kWh, et l'usine sidérurgique d'Hélouan, 125 millions de kWh. On compte qu'en 1965, l'activité de la fabrique d'Assouan aura augmenté de 50 pour cent, et que celle de l'aciérie aura doublé en 1975.

Prévision de la production future d'énergie

Compte tenu des principales données exposées ci-dessus, on prévoit que la production d'énergie électrique devra approximativement faire face aux besoins décrits dans le tableau 9.

Ainsi, ces besoins se situeraient entre les deux extrêmes suivants, selon que l'on adopte une hypothèse pessimiste ou optimiste :

1965 . . entre 6 500 et 7 500 millions de kWh
1975 . . entre 11 000 et 13 000 » »

En chiffres ronds, les besoins peuvent être évalués à :

1965 . . . . . 7 000 millions de kWh
1975 . . . . . 12 000 » »
2000 . . . . . 50 000 » »

Tableau 9

Prévision des besoins totaux en énergie en 1965 et en 1975

(En millions de kWh)

	1965	1975
Services publics	2 229	4 440
Électrification rurale	200	380
Travaux de drainage et d'irrigation effectués par les pouvoirs publics	650	1 070
Moteurs fixes isolés	500	1 240
Électrification des chemins de fer	300	1 000
Production autonome d'électricité	810	1 600
Fabrique d'engrais	2 100	2 100
Usine sidérurgique	125	250
TOTAL	6 914	12 080

A supposer que le taux actuel d'accroissement démographique demeure stable jusqu'en 1975, puis décline progressivement jusqu'en l'an 2000, la consommation par habitant peut se chiffrer à :

	kWh
1955	60
1965	280
1975	425
2000	1 400

A titre de comparaison, nous citerons les chiffres correspondants, ci-après, qui ont été tirés de l'*Annuaire statistique pour 1952* de la Conférence mondiale de l'énergie :

	kWh par habitant
Afrique	90
Amérique du Nord	2 360
Amérique du Sud	180
Asie	80
Europe occidentale	1 020
Océanie	1 150
Moyenne pour le monde	570

Cette comparaison montre à l'évidence que l'Égypte a grandement besoin d'énergie électrique et que les estimations données ci-dessus pour les vingt prochaines années sont inférieures même à la moyenne de *1952* pour le monde entier.

Bilan des besoins en énergie électrique et thermique pour les années 1965 et 1975

Étant donné les considérations qui précèdent, et à supposer que la consommation des ménages augmente légèrement dans les villes et les campagnes en raison de l'accroissement constant de la population et du développement général du pays, le bilan général des besoins électriques et thermiques pour les années 1965 et 1975 s'établit comme l'indique le tableau 10.

Nous pouvons rappeler que la nature aussi bien que l'ampleur de ces besoins se modifieront au cours

Tableau 10

Bilan des prévisions des besoins totaux en énergie

(En milliards de kWh)

	1955	1965	1975
Production d'énergie électrique	1,5	7	13
Moteurs fixes	1,5	0,5	0,5
Industries productrices de biens d'équipement[a]	0	(2,3)	(3,0)
Transports[b]	2,5	4	5
Consommation des ménages dans les villes[c]	2,0	2,5	3,0
Consommation des ménages dans les campagnes[c]	4,0	5	6
	11,5	19,0	27,5

[a] Ces chiffres ne sont pas compris dans le total.
[b] Non compris l'énergie nécessaire à l'électrification des chemins de fer, qui a été comptée sous la rubrique « Production d'énergie électrique ».
[c] Non compris les besoins en énergie électrique.

des vingt prochaines années, spécialement en ce qui concerne la proportion relative des combustibles qui seront consommés par les populations urbaines et rurales. On se servira moins des produits agricoles comme combustibles, et les précieuses matières organiques trouveront une meilleure utilisation comme engrais ou comme matière première pour des industries chimiques consommant des produits agricoles, notamment celles du papier, de la cellulose, des fibres textiles, etc. Dans les villes, d'autre part, plus nombreux seront ceux qui utiliseront les gaz combustibles produits accessoirement dans les usines sidérurgiques et les raffineries de pétrole.

Production d'énergie : installation de centrales hydrauliques

Nous examinerons maintenant les installations nécessaires pour satisfaire les besoins définis ci-dessus. Nous porterons évidemment toute notre attention sur la production d'énergie électrique, en premier lieu parce que c'est là une des applications les plus riches de promesses de l'énergie atomique, et en deuxième lieu, parce qu'elle est indispensable pour faire face à la plupart des nouveaux besoins prévus dans le bilan global (tableau 10). Nous envisagerons également la possibilité de faire appel à l'énergie solaire et à l'énergie éolienne pour satisfaire à une partie de nos besoins en énergie.

Deux principales centrales hydrauliques sont en cours d'aménagement à Assouan, dans l'extrême-sud du pays, à 800 km du Caire. La première de ces centrales, qui sera la moins grande, est en voie d'installation à proximité du réservoir d'Assouan dont la construction remonte à 1900. Équipée de sept générateurs principaux Kaplan de 47 MW chacun, et de deux générateurs complémentaires de

11,5 MW, elle aura une capacité installée de 345 MW au total. Ses principaux alternateurs sont solidement connectés à des transformateurs de 11 kV/132 kV.

L'énergie qu'elle produira servira à la fabrication d'engrais, à l'irrigation, et à l'exploitation des services publics dans les provinces méridionales d'Assouan et de Qena.

La deuxième centrale hydraulique est reliée au grand barrage de Saad el Ali. Ce barrage de roches et de terre de remplissage, qui sera construit à 6,5 km au sud d'Assouan, mesurera 5 km dans toute sa longueur. Une fois achevée, la centrale hydraulique du grand barrage comprendra 16 générateurs, de 16 MW chacun *.

La capacité de retenue du réservoir du grand barrage sera de l'ordre de 130 milliards de mètres cubes, soit vingt-six fois la capacité du réservoir actuel d'Assouan. Le niveau d'amont s'élèvera d'année en année. On trouvera au tableau 11 les évaluations des quantités d'énergie dont la production est assurée aux diverses étapes de la construction des centrales d'Assouan et du grand barrage.

On compte utiliser les eaux retenues dans le réservoir du grand barrage pour la mise en valeur de 2 000 000 de feddans (1 feddan = 4 200 mètres carrés).

Mis à part les projets ci-dessus, on pourra produire 150 MW en construisant des centrales hydrauliques à Assiout et à Essna, et en agrandissant la centrale hydraulique exploitée actuellement à Naga Hamadi.

Pour un avenir éloigné, l'Égypte étudie actuellement la possibilité de produire de l'énergie en amenant l'eau salée de la Méditerranée dans une dépression du désert occidental appelée « cuvette de Qattara ».

Le lac artificiel qui serait ainsi créé dans la cuvette de Qattara aura un niveau constant lorsqu'on aura équilibré l'évaporation de ses eaux et le débit de l'eau de mer se déversant dans la cuvette. La chute d'eau, d'une hauteur relativement constante entre le niveau du lac et celui de la mer sera utilisée pour la production d'électricité.

Divers projets actuellement envisagés devraient développer une puissance de l'ordre de 200 MW à 330 MW. Malheureusement, les travaux de construction nécessaires entraîneront de grands travaux d'excavation et le percement de galeries.

Le tableau 11 indique la puissance probable garantie, à savoir la puissance qui sera produite compte tenu de la production des générateurs en service à la centrale d'Assouan et à celle du grand barrage. La puissance garantie varie de mois en mois, en raison de l'inégalité des besoins de l'irrigation, et d'année en année, selon les divers stades de la construction et du remplissage progressif du réservoir du grand barrage.

Tableau 11

Production garantie d'énergie hydroélectrique des centrales du barrage d'Assouan et du grand barrage (décembre)

Année	Puissance garantie (en MW)
1959	125,5
1960	236,5
1961	241,5
1962-1963	234,5
1964	349,5
1965	432,5
1966	493,5
1967	521,5
1968	499,5
1969	515,5
1970-1973	682,5
1974	701,5
1975	746,5

Coût de production de l'énergie électrique

Le coût de production des centrales thermiques anciennes est relativement élevé à l'heure actuelle en raison de leur forte consommation de combustibles et du faible niveau de leurs facteurs de charge. On a pu améliorer les conditions d'exploitation des nouvelles centrales thermiques de construction récente ou en cours de construction.

La production d'énergie électrique devant être assurée dans l'avenir essentiellement par les centrales du barrage d'Assouan et du grand barrage, qui fourniront la charge de base avec un facteur de charge élevé, les centrales thermiques seront utilisées uniquement pour la charge de pointe, ou comme centrales de réserve.

On peut ajouter que les centrales hydrauliques se trouvent à 800 km au sud du Caire, point que l'on peut considérer comme le centre de gravité de la consommation d'énergie électrique.

Les centrales atomiques ne se justifieront du point de vue économique que si elles sont utilisées pour fournir la charge de base, avec un taux d'utilisation de l'ordre de 80 pour cent.

Dans la présente communication, il nous a donc semblé judicieux de calculer le coût de production (et de transmission) en indiquant :

1. Le coût de production des centrales en service, compte tenu de leurs taux d'utilisation actuels;

2. L'estimation du coût de production des centrales déjà construites ou commandées, pour un taux d'utilisation de 60 à 80 pour cent;

3. L'estimation du coût de production et de transmission des centrales d'Assouan, pour un taux d'utilisation de 60 à 80 pour cent.

* Ajoutons qu'à l'heure où nous rédigeons la présente communication, on envisage d'installer 16 générateurs supplémentaires, et que l'on établit les plans des travaux de génie civil qu'entraînera leur installation.

Tableau 12

Évaluation du prix de revient du courant électrique

1 000 millièmes = 1 livre égyptienne

1 livre sterling = 975 millièmes

Centrale	Taux d'utilisation (En pour cent)	Coût moyen (En millièmes par kWh)
Centrale diesel typique de 5 MW (chemins de fer Gabbary Rapulic)	43	7,5
Centrale à vapeur typique de 12,5 MW (Service de mécanique et d'électricité, Atf) .	48	5,0
Nouvelle centrale à vapeur de 100 MW, Le Caire-Nord (Administration de l'électricité et du gaz du Caire), charge de pointe de 70 MW à 66 kV aux barres	60	3,36
	80	3,03
Centrale à vapeur de 120 MW Le Caire-Sud (doit entrer en service en 1957-1958), charge de pointe de 100 MW à 66 kV aux barres	60	2,44
	80	2,28
Centrale hydraulique d'Assouan et du grand barrage — 1960-1975; énergie transmise vers le nord du pays et tension réduite à 66 kV	60	1,89
	80	1,64

Les coûts de production de l'électricité à la cuvette de Qattara ne sont pas connus avec certitude. Les évaluations varient considérablement, en fonction principalement des estimations du coût des travaux de génie civil (excavation et percement de galeries). Le Conseil permanent d'encouragement à l'expansion de la production nationale va prendre en charge l'étude complète de ce projet.

En l'état actuel des choses, on estime que le coût de production du kWh sera de l'ordre de 4 millièmes (1 penny = 4 millièmes) pour un taux d'intérêt de 3,5 pour cent sur les capitaux investis, et un taux d'utilisation de 80 pour cent.

Évaluation des besoins en électricité de source non hydraulique

En admettant que les programmes de production d'énergie hydroélectrique soient réalisés dans les délais prévus, il sera nécessaire de construire d'ici 1961 une nouvelle centrale thermique de 50 à 100 MW dans la région d'Alexandrie.

De 1963 à 1975, la puissance installée des centrales thermiques devra augmenter de 50 à 100 MW tous les quatre ans.

Ces chiffres reposent sur l'hypothèse où un réseau général de transmission sera installé; faute de quoi le pays aura besoin de quantités supplémentaires d'électricité. On constate donc qu'entre 1955 et 1975, il faudra construire en plus des centrales hydrauliques projetées de nouvelles centrales électriques dont la puissance totale s'élèvera à 500 MW.

Ensuite, si l'on accepte le taux d'accroissement indiqué au tableau 8 pour le quart de siècle qui s'étend de 1975 à 2000, la puissance devra augmenter de 150 MW chaque année. La centrale de Qattara permettra peut-être de faire face à une partie de ces besoins.

Ainsi, dans un avenir proche, l'Égypte se trouvera dans la nécessité absolue de faire appel à l'énergie atomique.

Centrales thermiques et centrales électronucléaires

Il est impossible de prévoir les progrès qu'accompliront la science et la technique en matière de production de chaleur et d'électricité de source nucléaire au cours des vingt prochaines années. Les découvertes se succèdent à un rythme rapide. Mais l'Égypte devra soigneusement étudier les données de la comparaison entre les centrales thermiques et les centrales électronucléaires, tout d'abord en 1957-1958, au moment où il lui faudra décider comment elle construira la centrale de 50 à 100 MW nécessaire dans la région d'Alexandrie, puis vers 1960-1961, au moment où elle étudiera les plans d'aménagement des centrales complémentaires. C'est alors seulement que l'on connaîtra le résultat définitif de la comparaison. Pour l'instant, on ne peut qu'en exposer les divers éléments.

Le prix de revient est le premier élément à étudier. Une centrale électronucléaire doit fournir la charge de base avec un taux d'utilisation aussi élevé que possible, de manière à tirer pleinement parti du faible coût des combustibles et à compenser le montant relativement élevé des premiers investissements. Actuellement le coût de production aux centrales thermiques égyptiennes ayant un facteur de charge de 80 pour cent est de 2,3 à 3 millièmes par unité. Dans le programme décennal britannique, l'estimation officielle est de 2,4 millièmes, chiffre qui soutient la comparaison avec le coût de production des centrales thermiques. Ces estimations sont valables à condition que le combustible nucléaire brûlé dans les piles soit utilisé de façon judicieuse. Nous sommes ainsi amené au second point de notre étude, l'intégration de l'industrie.

Du point de vue technique, la production d'électricité thermique ne présente aucune difficulté pour les pays insuffisamment développés. L'industrie de la fabrication des générateurs s'appuie sur des années d'expérience, le marché des combustibles — qu'il s'agisse de charbon ou de pétrole — est bien organisé et stable, et il n'y a pas de complication d'ordre militaire. Il est presque possible de passer

des commandes pour des centrales qui sont livrées, pour ainsi dire, au prix de revient. La situation est tout autre pour les centrales électronucléaires. On n'a pas encore beaucoup d'expérience; et l'expérience acquise n'est pas mise directement à la disposition de tous. Le combustible nucléaire est une matière d'intérêt militaire, et il ne se trouve pas sur le marché libre. Une fois le combustible obtenu, il faut le purifier et le traiter dans des usines spéciales et le vendre à un prix qui permette d'amortir en partie les investissements, ou il faut l'utiliser dans des piles d'un type nouveau. Ainsi, la production d'énergie électronucléaire est hérissée de difficultés et se heurte au manque d'intégration de l'industrie.

Troisième élément : les pays insuffisamment développés manquent de personnel qualifié. Il est assez peu probable que l'utilisation de l'énergie nucléaire en vue de la production d'énergie électrique donne lieu à la même suite d'événements que la découverte de la centrale thermique ou à moteur diesel. L'évolution sera différente, tout d'abord parce que la situation politique n'est plus la même et que les pays insuffisamment développés qui viennent d'accéder à l'indépendance se gardent de tout risque d'exploitation, et ensuite, parce que les connaissances techniques vont se répartir de façon moins inégale entre les différents pays. Les découvertes faites dans ces pays eux-mêmes et les travaux de recherche entrepris par les pouvoirs publics en collaboration avec des pays plus avancés contribueront beaucoup à effacer les erreurs politiques et à vaincre la méfiance.

Le quatrième facteur entrant en ligne de compte est la répercussion du changement de structure de la répartition mondiale des combustibles, avec les importantes conséquences qu'elle entraînera sur les plans économique et politique.

Prenons par exemple les transports : le combustible non atomique pèse 80 000 fois plus que le combustible atomique. Ainsi, l'industrie des transports de combustibles changerait progressivement d'aspect dans le monde. Il est improbable que l'on fasse appel au combustible nucléaire dans des délais si brefs et en des quantités si abondantes que la demande actuelle de charbon et de pétrole en soit bouleversée; il devrait plutôt servir de combustible complémentaire. Mais on s'attend évidemment que les milieux intéressés à l'extraction et au commerce des combustibles traditionnels fassent preuve d'une inertie bien compréhensible, même s'ils ne se sentent pas réellement en danger.

Programmes de recherche et de formation professionnelle

Seuls le progrès scientifique et la collaboration internationale permettront de résoudre les problèmes exposés ci-dessus à l'avantage de toutes les parties intéressées. Il va de soi que la science a plus de chances de progresser dans les pays les plus avancés dans le domaine des sciences et de la technique nucléaires. Mais il est de l'intérêt de tous les pays que des programmes de formation professionnelle soient mis sur pied dans les pays moins développés, et que des piles expérimentales servant à la production d'énergie et à la propulsion soient réalisées. Ces programmes visent tout d'abord à la formation, dans les divers pays, de techniciens qui seront chargés d'initier leur pays respectif à la nouvelle ère atomique; puis ils donneront des résultats positifs et reculeront les limites de notre connaissance, et enfin ils ouvriront les marchés du monde aux exportateurs de produits atomiques.

Il est donc probable que l'Égypte installera une centrale électronucléaire témoin de 5 à 10 MW, qui sera un centre de recherches et de formation professionnelle, avant même que ne soient construites des centrales véritablement productives.

Possibilités offertes par l'énergie solaire et l'énergie éolienne

L'Égypte, pays désertique, pourrait tirer profit de toute découverte valable permettant d'utiliser l'énergie solaire comme source pratique et économique d'énergie.

Des essais de distillateurs ont donné un débit quotidien de 3 litres d'eau distillée au mètre carré. A la suite de nouveaux perfectionnements, on espère porter ce débit à 5 litres. D'autres appareils solaires sont à l'essai, et l'Institut égyptien de la zone désertique (Héliopolis – Le Caire) s'occupe activement de ce problème qui semble ouvrir des perspectives intéressantes dans certaines directions; il n'est guère probable toutefois qu'au cours des vingt prochaines années l'énergie solaire modifie sensiblement le bilan thermique et énergétique de notre pays.

Il serait possible de tirer parti de l'énergie éolienne dans certaines régions du Nord situées à l'ouest d'Alexandrie, et probablement, dans certains lieux isolés de la côte de la mer Rouge. Les vents dominants sont généralement modérés, et dans l'Égypte ancienne déjà, ils ont permis d'établir des communications fluviales sur le Nil. Ici encore, il est peu probable que des machines éoliennes constituent une importante source d'énergie au cours des vingt prochaines années.

Les besoins futurs et les ressources de la Finlande en énergie électrique et thermique

par Bror Nordqvist*

LA CONSOMMATION TOTALE D'ÉNERGIE EN FINLANDE

Le tableau 1 indique la consommation totale d'énergie électrique et thermique en Finlande pendant la période 1928-1954, telle qu'elle a pu être établie d'après les chiffres disponibles. Jusqu'à présent, l'énergie fournie provenait principalement de l'utilisation des ressources hydrauliques du pays. Les combustibles minéraux faisant défaut à la Finlande, les ressources naturelles du pays en combustibles sont le bois, sous forme de bois de feu, bois de rebut, déchets ou sous-produits industriels, et la tourbe. Les autres combustibles nécessaires doivent être importés; il s'agit principalement du charbon, du coke et des combustibles liquides, tels que l'essence, le pétrole lampant et les autres produits pétroliers. On fabrique du coke dans les deux usines à gaz du pays; leur production permet de couvrir 20 pour cent de la demande de coke. De toute façon, la matière première, le charbon, doit être importée.

Ce tableau énumère les utilisations de l'énergie électrique et hydraulique et des combustibles importés et nationaux. On a converti les diverses quantités d'énergie et de combustibles en équivalents de charbon au moyen de coefficients appropriés. Un examen attentif du tableau permet de constater les faits suivants qui ont marqué l'évolution intervenue au cours de la période 1928-1954 :

La production d'énergie hydraulique a augmenté 4,86 fois soit, en moyenne, d'environ 6,3 pour cent par an.

La consommation de combustibles importés a augmenté 2,75 fois soit, en moyenne, d'environ 4 pour cent par an.

La consommation des combustibles nationaux est demeurée à peu près inchangée. L'estimation de la « consommation de bois de feu dans les districts ruraux », qu'on a incluse dans cette section du tableau et qui est demeurée stable pendant toute la période considérée, est fondée sur une étude très précise de l'utilisation du bois en 1938.

La consommation totale d'énergie, y compris la « consommation de bois dans les districts ruraux », était, convertie en charbon : en 1954 d'environ 11,6 millions de tonnes, ce qui correspond à environ 2,8 tonnes par an et par habitant.

La consommation totale a augmenté : en 1928-1954 d'environ 1,6 fois, ce qui correspond à environ 2 pour cent par an.

Si l'on néglige la « consommation de bois dans les districts ruraux », la susdite consommation totale d'énergie a augmenté d'environ 2,1 fois, ce qui correspond à environ 3 pour cent par an.

L'augmentation de la consommation d'énergie se réduit pratiquement à une augmentation de la consommation d'énergie électrique et de combustibles importés, tandis que la consommation de combustibles nationaux est demeurée pratiquement inchangée. La consommation d'énergie électrique représente 23 pour cent de la consommation totale d'énergie. Ce pourcentage est relativement faible par rapport aux proportions correspondantes que connaissent de nombreux pays plus industrialisés que la Finlande. Ceci indique que la tendance de la consommation d'énergie électrique en Finlande est nettement orientée à la hausse, ce qui provoquera une augmentation correspondante de la proportion dont il est fait mention ci-dessus. L'accroissement de la consommation de combustibles importés, qui s'est produite surtout pendant les dernières années, est due presque entièrement à l'utilisation accrue de combustibles liquides dans les entreprises industrielles et commerciales, dans les appareils de chauffage domestique, et à l'augmentation ininterrompue de la demande de carburants pour les véhicules.

Lorsqu'on examine les chiffres cités plus haut, on doit tenir compte du fait que la superficie de la Finlande est actuellement de 337 000 km² environ, soit quelque 12 pour cent de moins qu'avant la deuxième guerre mondiale. La cession de certains territoires a entraîné d'importantes pertes en électricité hydraulique exploitée et en régions industrielles. L'accroissement de la population pendant les années 1928-1953 a été de quelque 24,5 pour cent, ce qui correspond, en moyenne, à 0,9 pour cent par an environ.

Original : anglais.

* Association pour l'étude de l'économie de l'énergie électrique et des combustibles « Ekono », Helsinki.

Tableau 1

Consommation totale d'énergie électrique et de combustibles en Finlande

Évaluation établie d'après les données statistiques existantes

	Unités	1928	1938	1948	1954	1960
Énergie électrique						
Hydraulique	Millions de kWh	800	2 456	1 923	4 850	7 100
Produite par condensation de vapeur	»	290	162	623	280	1 800
Produite par la vapeur de contre-pression	»	110	490	396	620	850
Total	»	1 200	3 108	2 960	5 750	9 750
Fournie aux chaudières équipées à l'électricité	»	—	419	58	270	—
Total, déduction faite de l'électricité fournie aux chaudières équipées à l'électricité	»	1 200	2 689	2 902	5 480	9 750
Converti en charbon[a]	Milliers de tonnes	567	1 197	1 332	2 554	4 600
Énergie hydraulique mécanique	Millions de kWh	200	200	200	175	
1. Total de l'énergie hydraulique converti en charbon	Milliers de tonnes	500	1 202	1 044	2 431	
Combustibles importés						
Charbon	Milliers de tonnes	1 076	1 560	1 720	1 490	
Coke	»		270	330	480	
Mazout	»		35	94	409	
Essence, pétrole lampant, etc.	»	111	199	269	507	
2. Total converti en charbon	»	1 253	2 204	2 630	3 440	4 400
Combustibles indigènes[b]						
Bois de chauffage commercial	Millions de mètres cubes	7,6	8,1	9,3	8,1	
Tourbe	Milliers de tonnes	20	25	223	150	
Déchets de bois industriels (en stères)[c]	Millions de mètres cubes	5,4	7,1	5,1	5,9	
Consommation de bois de chauffage dans les districts ruraux	»	20,1	20,1	20,1	20,1	
3. Total converti en charbon	Milliers de tonnes	5 530	5 890	5 860	5 750	6 000
Total à l'exclusion de la consommation de bois dans les districts ruraux	»	2 180	2 540	2 510	2 400	
Total de la consommation d'énergie						
Postes 1 à 3 convertis en charbon	Milliers de tonnes	7 283	9 296	9 534	11 621	15 000
Postes 1 à 3 convertis en charbon à l'exclusion de la consommation rurale de chauffage	»	3 933	5 946	6 184	8 271	11 650

[a] Le combustible utilisé pour produire de la vapeur est compris dans la consommation de combustible.

[b] Mesures empilées.

[c] Y compris les lessives résiduaires de la cuisson du bois.

PRÉVISIONS DE L'AUGMENTATION DE LA DEMANDE D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE ET DE COMBUSTIBLES

Les diagrammes des figures 1 et 2 permettront de comprendre l'évolution de la consommation d'énergie en Finlande au cours des années 1928-1954, telle qu'elle ressort des données statistiques dont nous avons parlé ci-dessus, et de prévoir l'évolution de la demande jusqu'en 1970.

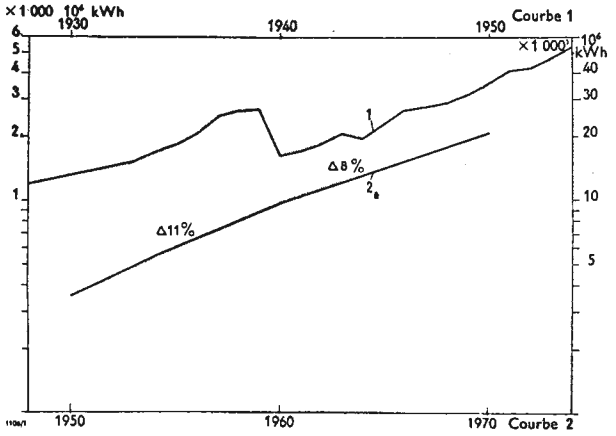


Figure 1. — La consommation d'énergie en Finlande, à l'exclusion des chaudières à l'électricité.

1. Sur la base des données statistiques de 1928 à 1954 (depuis 1940, territoire actuel de la Finlande).
2. Prévisions à partir de 1954.

On estime que la consommation d'énergie électrique augmentera de quelque 11 pour cent par an jusqu'en 1960 (fig. 1). Ce taux d'accroissement correspond à l'évolution indiquée par les statistiques pour les dernières années. Il est aussi partiellement fondé sur des études, approfondies et détaillées, effectuées récemment en Finlande, de l'évolution de la demande d'énergie des centrales électriques et des entreprises industrielles au cours des prochaines années. On estime qu'après 1960 la demande d'énergie électrique augmentera d'environ 8 pour cent par an. Ce taux, qui peut paraître élevé, est en fait très plausible si l'on considère qu'après 1960 la Finlande disposera encore, ainsi qu'on l'exposera par la suite, de ressources hydrauliques inexploitées, et si l'on tient compte du fait qu'à présent la part de l'énergie électrique dans la consommation totale d'énergie finlandaise est relativement faible.

L'évaluation de la consommation future de combustibles est illustrée par la figure 2.

On estime que la consommation de combustibles indigènes, principalement le bois, les déchets de bois et la tourbe, demeurera pratiquement stable. L'emploi du bois comme combustible, principalement dans les foyers des districts ruraux, diminuera probablement en raison des améliorations techniques apportées aux appareils de chauffage et de cuisine. (Un nouveau rapport détaillé sur l'utilisation du bois à la campagne est en préparation, mais il ne sera pas achevé avant deux ans environ.) Par contre, on prévoit une utilisation accrue de la tourbe, ainsi qu'on le montrera plus loin.

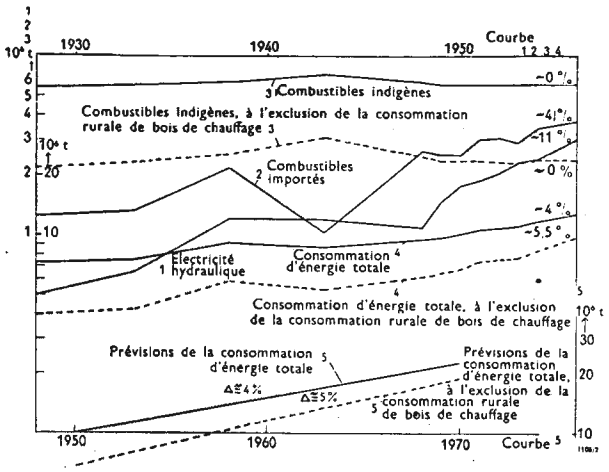


Figure 2. — La consommation totale d'énergie en Finlande, convertie en charbon.

Évaluation établie d'après les données statistiques disponibles relatives à la période 1928 à 1954. Prévisions à partir de 1954.

En ce qui concerne les combustibles importés, on estime que, d'ici 1970, leur consommation s'accroîtra au même rythme qu'au cours des années précédentes, soit de 4 pour cent. Ceci correspond également à l'évolution moyenne intervenue tout au long de la période de 1928 à 1954.

Ces essais de prévision de la consommation d'énergie aboutissent, pour les années 1960 et 1970, à la demande totale d'énergie électrique et de combustibles indiquée au tableau 2.

Ces évaluations sont naturellement fondées sur l'hypothèse que l'activité commerciale continuera à se développer sans interruptions d'aucune sorte.

Tableau 2

Demande totale d'énergie électrique et de combustibles

	1960	1970
	En millions de tonnes	
Énergie électrique (9 750 millions de kWh)	4,6[a]	10,0
Combustibles importés . . .	4,4	6,5
Combustibles indigènes . . .	6,0	6,0
TOTAL	15,0	22,5
Rapport de l'énergie électrique à l'énergie totale . .	30 %	45 %

[a] 21 000 millions de kWh.

Il est évidemment impossible de faire une évaluation précise et plausible pour une période qui excède quelques années. Aussi peut-on estimer qu'il est trop audacieux d'étendre cette évaluation jusqu'à l'année 1970. A plus forte raison ne peut-on que deviner la situation qui se présentera en l'an 2000. Mais si l'on admet que l'évolution après 1970 présentera les mêmes caractéristiques qu'au cours des trente dernières années, on peut se risquer à prévoir qu'à la fin du siècle, la consommation totale d'énergie équivaudra au moins à 40 ou 50 millions de tonnes de charbon, la demande portant pour plus de la moitié sur l'énergie électrique.

LES RESSOURCES EN COMBUSTIBLES INDIGÈNES ET LEURS POSSIBILITÉS D'UTILISATION

L'énergie hydraulique et la demande d'énergie électrique

Le tableau 3 indique en chiffres ronds, d'après les évaluations actuelles, les ressources en énergie hydraulique de la Finlande, exploitables d'un point de vue économique. Ces ressources sont réparties selon les différents bassins hydrographiques :

Tableau 3

Ressources de la Finlande en énergie hydraulique

	Fleuves		Affluents		Bassins hydrographiques	
	MW	Millions de kWh	MW	Millions de kWh	MW	Millions de kWh
Vuoksi . .	205	1 300	165	800	370	2 100
Kymijoki .	210	1 300	60	300	270	1 600
Kokemäenjoki .	210	1 000	40	200	250	1 200
Oulujoki .	430	2 200	120	600	550	2 800
Iijoki . . .	200	1 000	—	—	200	1 000
Kemijoki .	730	3 700	300	1 500	1 030	5 200
Tornionjoki . .	300	1 500	—	—	300	1 500
Autres rivières .	300	1 600	—	—	300	1 600
TOTAL . .	2 585	13 600	658	3 400	3 270	17 000

D'après les prévisions de l'augmentation de la demande d'énergie électrique dont il est fait état ci-dessus, la consommation d'énergie électrique atteindra environ 9 750 millions de kWh en 1960 et environ 21 000 millions de kWh en 1970. A condition que l'on exécute de façon efficace les plans de construction de nouvelles centrales hydrauliques, le pays disposera d'une puissance installée hydraulique suffisante pour faire face à la demande accrue d'électricité, telle qu'elle a été calculée pour les 10 ou 12 années à venir. Cependant, un tel programme de construction sera peut-être difficile, sinon impossible à réaliser, eu égard aux énormes investissements qu'il requiert.

La puissance installée et la production d'énergie nominale estimées pour une hydraulicité moyenne des ressources hydrauliques exploitées ont atteint, en Finlande, à la fin de 1953 et de 1954, les chiffres respectifs suivants :

	Puissance installée (en MW)	*Production nominale d'énergie* (en millions de kWh par an)
31 déc. 1953 . . .	857	4 830
31 déc. 1954 . . .	971	5 370

Le tableau 4 énumère les centrales hydrauliques qui sont actuellement en construction, leur puissance installée, les quantités d'énergie qu'elles fourniront à hydraulicité moyenne et la date escomptée de leur entrée en service.

Les chiffres cités au tableau 4 indiquent la puissance installée de la centrale et la quantité d'énergie produite chaque année.

On a dressé un bilan de l'énergie électrique pour les années 1957 et 1960, en admettant qu'on pourra mettre en exploitation, au cours de la période 1958-1960, une puissance hydraulique à peu près égale à la puissance installée au cours de la période 1955-1957, et que la demande d'électricité s'accroîtra conformément aux prévisions. Mais, le tableau 5 fait également ressortir l'importance qu'il convient d'accorder à la construction de centrales thermiques.

Le tableau 1 permet de voir que, si l'énergie hydraulique occupe une position prédominante, on produit néanmoins, et ceci pour des raisons qu'on ne pourra indiquer que brièvement ci-après, des quantités considérables d'électricité thermique, tant par des groupes à condensation de vapeur que par des groupes à contre-pression.

L'exploitation économique de l'énergie hydraulique exige que des centrales d'électricité auxiliaires puissent suppléer au déficit de production pendant les années de faible hydraulicité. Pour répondre à ces besoins, on utilise essentiellement des centrales thermiques à condensation de vapeur, qui servent également d'auxiliaires des centrales hydrauliques, en cas de panne mécanique ou d'interruption des lignes de transport. Les mêmes centrales produisent également de l'énergie aux heures de pointe dans les centres de consommation, si les possibilités de réglage des centrales hydrauliques par 24 heures sont insuffisantes, ou si le transport de l'énergie demandée n'est pas économiquement avantageux, ou techniquement possible, en raison de l'éloignement des centrales.

Dans les entreprises industrielles qui utilisent des quantités considérables de vapeur en raison de leurs procédés de fabrication, on a avantage à produire de l'énergie à l'aide de turbines à contre-pression. Dans ces entreprises, une partie de la chaleur produite par la vapeur sera transformée en énergie électrique, alors que le reste sera utilisé dans le processus industriel. Les centrales thermiques à contre-pression de vapeur offrent un double avantage : le faible coût de leur construction et

Tableau 4

Centrales hydrauliques actuellement en construction

Centrales	1955		1956		1957		Total	
	MW	Millions de kWh	MW	Millions de kWh	MW	Millions de kWh	MW	Millions de kWh
Nuojua, groupe III	27	65					27	65
Pamilo, groupes I-II	50	240					50	240
Montta, groupes I-III	28	190	14	40			42	230
Utanen, groupes I-III			27	170	27	110	54	280
Petäjäskoski, groupes I-II					93	460	93	460
Kallioinen, groupe I			12	42			12	42
Hilmo, groupe I			6	27			6	27
Atro, groupe I			6	16			6	16
Vuolenkoski, groupes I-III					11	55	11	55
TOTAL	105	495	65	295	131	625	301	1 415
Total par année pour le pays	1 076	5 865	1 141	6 160	1 272	6 785	1 272	6 785

une faible consommation de combustible par unité d'énergie. L'électricité de contre-pression est d'autant plus avantageuse qu'elle atteint sa production maximum en hiver, au moment où la production d'énergie hydraulique diminue. Cette catégorie de centrales comprend encore les centrales de chauffage des quartiers résidentiels, où la vapeur, après avoir passé par les turbines, est utilisée pour le chauffage d'habitations, et à d'autres fins de chauffage.

Au cas où l'on ne pourrait exploiter de l'énergie hydraulique supplémentaire en plus grande quantité que ce qui est mentionné au tableau 5, la demande d'électricité produite par les groupes à condensation de vapeur serait considérable. Si l'on désire éviter des restrictions de consommation pendant les périodes d'étiage, le déficit de débit sera : en 1957 d'environ 200 MW, en 1960 d'environ 380 MW.

Tableau 5

Bilan énergétique évalué pour les années 1957 et 1960

	1957 (En millions de kWh par an)		1960 (En millions de kWh par an)	
Demande d'électricité	7 700		9 750	
Puissance hydroélectrique au 31 décembre	6 785		8 200	
Production hydroélectrique :				
Par an à une hydraulicité moyenne	6 500		7 900	
Utilisable pour des besoins primaires pendant une année d'hydraulicité moyenne, 90 pour cent	5 900		7 100	
Dans les années à faible hydraulicité (comme ce fut le cas en 1947-1948)		3 900		5 000
Déficit :				
Pour une année d'hydraulicité moyenne	*1 800*		*2 650*	
Pour les années de faible hydraulicité		*3 800*		*4 750*
Production d'électricité thermique par contre-pression (estimation) :				
Hydraulicité moyenne	750		850	
Faible hydraulicité		1 100		1 250
Électricité par condensation de vapeur nécessaire pour satisfaire à la demande totale :				
Hydraulicité moyenne	1 050		1 800	
Faible hydraulicité		2 700		3 500

Le tableau 5 démontre clairement la nécessité d'intensifier la construction de centrales, tant hydrauliques que thermiques.

On ne construit actuellement que deux centrales électriques à condenseur d'une puissance installée d'environ 60 MW, ce qui correspond à peu près à l'augmentation de la demande pendant un an.

Il conviendra d'accorder une grande attention aux économies et au rendement dans l'élaboration des plans des centrales thermiques et dans leur construction; ceci s'impose d'autant plus que, du fait que les ressources hydrauliques sont limitées, la part de l'électricité thermique dans le total de la production d'électricité s'accroît. Actuellement, il s'agit principalement de centrales au charbon ou au mazout, mais on a toutes les raisons de s'orienter, dans la mesure des possibilités économiques, vers la construction des centrales utilisant le bois ou la tourbe, que l'on peut exploiter même si des arrêts se produisaient dans l'importation de combustibles étrangers. Afin d'améliorer la position économique du pays en matière de combustibles, on devra construire, aussi souvent que possible, des centrales thermiques à contre-pression de vapeur et des centrales de chauffage locales pouvant engendrer du courant électrique.

La demande d'énergie thermique augmentera dans un proche avenir, et sa tendance est d'augmenter davantage. Aussi devra-t-on étudier les possibilités de construire des centrales nucléaires, et prendre les mesures requises pour assurer la formation de techniciens dans ce domaine dont les possibilités pratiques continueront à se développer.

Le bois de chauffage

En Finlande, les forêts s'étendent sur environ 21,7 millions d'hectares, soit 71 pour cent de la superficie totale du pays. Les études sylvicoles montrent que les arbres sur pied équivalent à une quantité de bois débité d'environ 2 350 millions de m³, l'augmentation annuelle étant d'environ 70 millions de m³. De l'avis des experts et en tenant compte de toutes les considérations relatives à l'exploitation forestière, on peut abattre jusqu'à 75 à 80 pour cent de cette dernière quantité. On utilise une part considérable de la croissance annuelle des pins et des sapins, et une part moindre de la croissance des bouleaux et d'autres espèces, comme matière première pour l'industrie du bois ou pour l'exportation de bois en grumes. En outre, le bois est largement utilisé comme matériau de construction. La quantité de bois qui peut et doit être utilisée comme combustible relève donc des services de conservation des forêts. Du point de vue de l'économie nationale, la valeur du bois est plus grande s'il sert de matière première à l'industrie. Cependant, des méthodes sylvicoles appropriées et une bonne conservation des forêts permettront d'obtenir de grandes quantités de bois de chauffage et de rebut, inutilisables au stade actuel de la chimie du bois comme matière première dans l'industrie de la pâte à papier. Ceci vaut tout particulièrement pour les bouleaux. On trouve encore, dans les forêts éloignées, de grandes quantités de bois qui ne peuvent servir que de combustibles, et il se passera encore quelque temps avant que tout ce bois de chauffage puisse servir de matière première à l'industrie chimique du bois et aux industries connexes.

Actuellement, on calcule que la quantité de bois de chauffage mis sur le marché doit être de l'ordre de 6 à 8 millions de mètres cubes débités par an. Les données commerciales sur la consommation de bois sont de l'ordre de grandeur cité. Ainsi qu'il ressort de l'étude faite sur l'utilisation du bois en 1938, une grande partie des bois commerciaux consiste en environ 20 millions de mètres cubes de bois de chauffage et de rebut, consommés dans les districts ruraux. La rationalisation de cette consommation permettrait au pays de faire de grandes économies. Ce chiffre comprend également de grandes quantités de bois qui ne peuvent être utilisées actuellement par l'industrie, comme on l'a déjà dit, mais il est probable que sur ce point la situation se modifiera.

L'utilisation du bois et des déchets de bois semble donc devoir demeurer stationnaire au cours des prochaines années. La consommation aura, toutefois, tendance à diminuer, dans la mesure où la rationalisation des méthodes de chauffage et de traitement du bois continuera de progresser.

Les déchets de bois comprennent, outre les déchets de coupe proprement dits, des déchets liquides provenant des industries de la pâte au sulfate et au sulfite, et également de l'alcool-sulfite. Sur la base de la capacité de production totale à l'heure actuelle, les premiers déchets équivalent à une quantité de 700 000 tonnes de charbon par an; la moitié environ de ces déchets est utilisée. Quant à l'alcool de bois, il est de peu de valeur en tant que source d'énergie.

La tourbe

Théoriquement, la tourbe est une des principales ressources naturelles de combustible du pays. Environ 10 millions d'hectares, c'est-à-dire à peu près le tiers de la superficie totale de la Finlande, sont des tourbières. La plus grande partie des ressources en tourbe n'a pas encore été prospectée, mais les tourbières du pays contiennent certainement plus de 600 millions de tonnes de tourbe séchée, ce qui correspond à plus de 300 millions de tonnes de charbon. En citant ce chiffre, on ne tient compte que des tourbières suffisamment étendues et dont la couche est suffisamment profonde pour permettre une exploitation mécanique du combustible. La production de tourbe et son utilisation comme combustible ne sont donc pas limitées du fait des gisements. Cependant, les conditions atmosphériques limitent le séchage de la tourbe à une saison de deux mois par an environ. L'exploitation

des tourbières exige également des capitaux considérables et beaucoup de main-d'œuvre. C'est pourquoi la tourbe ne peut concurrencer les autres combustibles. Les possibilités de production de tourbe resteront faibles si l'on n'améliore pas sensiblement les méthodes d'extraction, de traitement et d'entreposage, ou si l'on ne met pas au point de nouveaux procédés pour utiliser l'énergie contenue dans la tourbe sous forme de combustibles liquides ou gazeux. On doit espérer qu'on trouvera une solution à ces problèmes, car, en dehors de la tourbe, la Finlande ne dispose plus de sources d'énergie exploitables. Nombreux sont les autres pays où l'on poursuit des expériences dans ce domaine.

COMBUSTIBLES IMPORTÉS

Ainsi qu'on l'a signalé ci-dessus, la proportion de combustibles importés par rapport à la consommation totale d'énergie en Finlande, augmente. C'est pourquoi des mesures doivent être prises pour assurer le transport, la manutention et l'entreposage qu'exige l'utilisation économique et efficace du combustible. La proportion relative de charbon, de coke et de combustibles liquides peut varier naturellement selon le prix, la situation des marchés, les possibilités d'utilisation, etc. On doit toutefois signaler que, puisqu'il faut importer de très grandes quantités de coke, un accroissement de la production intérieure du coke revêt une grande importance au point de vue de l'économie du pays. En outre, les cokeries pourraient produire, en même temps que du gaz, divers sous-produits utiles.

Dans la mesure où, dans un proche avenir, les piles nucléaires pourraient fournir l'énergie thermique nécessaire aux centrales électriques et aux centrales de chauffage de la Finlande, il faudrait sans doute inclure, dans les importations de combustibles, les fournitures de combustibles nécessaires au fonctionnement de ces piles. On ne sait pas encore, à l'heure actuelle, si la Finlande pourra compter à cet égard, tout au moins partiellement, sur ses propres ressources naturelles. En effet, on n'a pas encore effectué de recherches pour savoir si la Finlande possède des gisements d'uranium ou de thorium.

Besoins et ressources de la Grèce en énergie électrique et thermique au cours des quarante années à venir

par la Commission de l'énergie atomique de la Grèce

La Grèce a une superficie de 135 000 km² et une population de 8 millions d'habitants. Plus de la moitié du pays consiste en collines et en montagnes de hauteur moyenne. En raison de la sécheresse du climat et de l'aridité des montagnes, la quantité d'eau à l'intérieur des terres est limitée. Le débit des cours d'eau est généralement très irrégulier et un grand nombre des petites rivières tarissent durant les mois d'été. Aussi les ressources en énergie hydraulique sont-elles limitées et leur utilisation coûteuse.

Les seuls combustibles que l'on trouve en Grèce sont les lignites. La recherche d'autres combustibles solides, liquides ou gazeux a été, jusqu'à présent, infructueuse. Les autorités compétentes estiment que l'ensemble des gisements de lignite représente un million de kilotonnes. En outre, il faut indiquer : *a*) que les gisements sont généralement pauvres en calories par kilogramme; *b*) que leur exploitation n'est pas toujours rentable; et *c*) que le transport n'est pas toujours facile; leur emploi est de ce fait limité à la production d'énergie électrique sur place.

Les inconvénients mentionnés ci-dessus et l'exploitation restreinte de l'énergie hydraulique ont pour effet d'augmenter sans cesse l'emploi de combustibles étrangers, la plupart liquides (voir tableau 1).

Tableau 1

Combustibles

(En kilotonnes)

Type de combustibles	1938	1948	1954
Liquides (importés) . .	370	830	1 400
Solides (importés) . . .	900	300	250
Lignites (local)	110	125	850

Le tableau 1 montre une diminution des importations de combustibles solides et une forte augmentation des importations de combustibles liquides et ceci en dépit d'une production croissante de lignite.

Original : anglais.

Pour réduire l'importation de combustibles et se rendre plus indépendante à l'égard des autres pays, la Grèce a commencé, il y a quelques années, à accroître l'exploitation locale des gisements de lignite, surtout pour la production d'énergie électrique. Pour les mêmes raisons, elle a entrepris un vaste programme d'aménagement hydraulique.

La tendance actuelle est de n'employer des combustibles importés que dans les cas où il n'y a techniquement pas d'autre solution. On estime que ces cas représentent 50 pour cent des combustibles liquides actuellement importés. Le reste sera progressivement employé à la production d'énergie électrique.

L'industrialisation du pays, l'électrification rurale la consommation électrique grandissante par habitant, due à l'augmentation du niveau de vie, sont autant de raisons qui exigent un accroissement de la production d'énergie électrique.

Le programme actuel d'augmentation de la production électrique consiste à exploiter les ressources locales; il s'étendra jusqu'en 1965, année où l'on espère atteindre 2 950 GWh ($G=10^9$), au lieu de 1 350 GWh produits aujourd'hui. Ces 2 950 GWh correspondent à une consommation annuelle de 350 kWh par habitant. Cette production, remarquons-le, sera encore très inférieure à celle d'autres pays (d'après les statistiques de 1952, la consommation annuelle par habitant est de 1 100 kWh pour la Belgique, 940 kWh pour l'Autriche et 630 kWh pour l'Italie).

En raison du faible niveau de production en 1965, nous pouvons dire que les efforts en vue de l'électrification se poursuivront au cours de la période 1965-1975, à la fin de laquelle on espère que la production atteindra 5 850 GWh. Pendant les 25 années suivantes (1975-2000), la production pourrait doubler et atteindre au total, en l'an 2000, 12 200 GWh. Ce dernier chiffre correspond à une consommation annuelle d'environ 1 000 kWh par habitant et tient compte de l'accroissement de la population ainsi que de l'amélioration du niveau de vie, en temps de paix.

Comme on l'a dit plus haut, le lignite et l'énergie hydraulique sont les seules sources d'énergie que possède le pays. Le potentiel hydroélectrique de la

Grèce ne dépasse pas 1,3 GW, ce qui représente une production annuelle maximum de 5 100 GWh; on espère que la totalité de ces ressources sera exploitée en l'an 2000.

Les gisements de lignite sont en général pauvres, et leur exploitation n'est pas rentable en comparaison de l'énergie produite par les combustibles liquides. La raison principale pour laquelle on les emploie est qu'ils n'influent pas sur la balance des devises. L'exploitation intensive des lignites produira en 1965 1 200 GWh, et pourra atteindre 2 200 GWh vers l'an 2000.

A part les lignites et l'énergie hydraulique, il ne semble pas qu'il y ait d'autre source d'énergie exploitable. Si l'on compare l'énergie qu'il est possible d'obtenir et celle dont on aurait besoin, il ne semble pas qu'un déficit important doive apparaître au cours des dix prochaines années, ceci grâce à la mise en exploitation intensive de l'énergie hydraulique. Ce déficit commencera à augmenter à partir de 1965 et dans les années suivantes, et ne pourra être compensé que par l'importation de combustibles liquides, ce qui constituera un facteur défavorable pour notre balance des devises. Il faut donc considérer toute nouvelle source d'énergie comme présentant un intérêt primordial pour l'économie du pays.

Tableau 2

Données relatives à la production d'énergie électrique

a) Puissance installée en GW

Année	Puissance totale	Centrales hydrauliques	Centrales thermiques	Répartition des centrales thermiques selon le combustible	
				Lignite	Combustibles importés ou autres
1955 .	0,38	0,11	0,27	0,08	0,19
1965 .	0,75	0,37	0,38	0,20	0,18
1975 .	1,40	0,70	0,70	0,32	0,38
2000 .	2,80	1,30	1,50	0,36	1,14

b) Production annuelle en GWh

Année	Production totale	Centrales hydrauliques	Centrales thermiques	Répartition des centrales thermiques selon le combustible	
				Lignite	Combustibles importés ou autres
1955 .	1 350	300	1 050	360	690
1965 .	2 950	1 600	1 350	1 200	150
1975 .	5 850	3 000	2 850	1 920	930
2000 .	12 200	5 100	7 100	2 200	4 900

Les besoins en énergie de l'État d'Israël

par le Comité israélien de l'énergie atomique

Cet exposé sur les futurs besoins en énergie de l'État d'Israël se fonde sur des hypothèses qui diffèrent quelque peu de celles que l'on utilise en général dans de tels calculs. Comme l'État d'Israël n'existe que depuis sept ans, toute extrapolation des données actuelles dans un avenir éloigné paraîtrait hasardeuse. D'autre part, les moyennes mondiales admises — telles qu'elles ressortent, par exemple, de l'ouvrage de Putnam : « L'Énergie dans l'avenir » — correspondent à des conditions de progrès plus ou moins régulier, ce qui n'est pas le cas de l'évolution actuelle de l'État d'Israël. On comprendra peut-être mieux la manière dont se présente le problème en examinant la figure 1, qui dépeint le développement des ventes de courant électrique dans divers pays et montre que la période nécessaire pour que la consommation d'électricité double est de dix ans dans les pays les plus évolués, alors qu'en Israël la consommation d'électricité double tous les quatre ans.

Trois raisons expliquent cette différence :

a) Israël est un pays d'immigration continue.

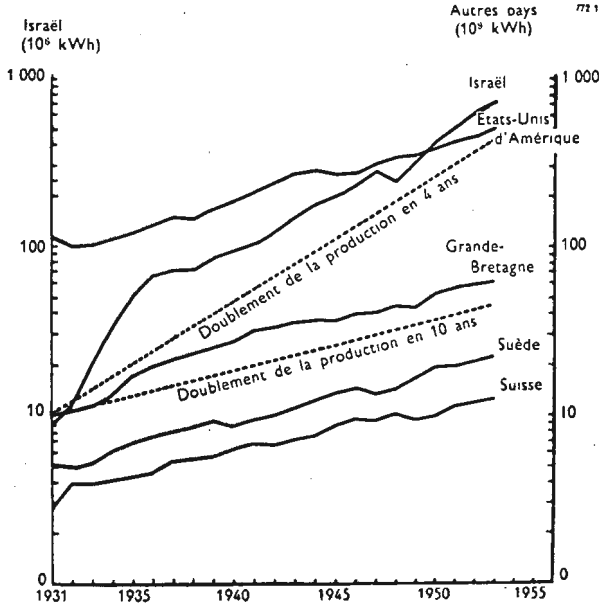


Figure 1. — Le développement des ventes de courant électrique dans divers pays; échelle logarithmique.

Original : anglais.

b) Israël cherche à élever le standard de vie de ses immigrants jusqu'aux normes de l'Occident. Dans ce but, cet État s'efforce de développer simultanément l'industrie et l'agriculture.

c) Israël procède en ce moment à la mise en culture du désert méridional, région qui a été ravagée par les forces de la nature et par suite de la négligence de ses habitants, et que l'on s'efforce actuellement de rendre habitable.

Pour de telles raisons, il semble préférable de limiter le présent exposé aux dix prochaines années à venir, soit jusqu'en 1964, et non de l'étendre aux cinquante prochaines années, ainsi que le propose le programme de la Conférence.

BESOINS EN ÉNERGIE

État actuel

Nous proposons, comme point de départ, les données suivantes relatives à l'année 1954 :

Nombre d'habitants	1 700 000
Consommation totale d'énergie	$1{,}1 \times 10^6$ tonnes de pétrole $= 4{,}4 \times 10^{13}$ Btu (environ 11 trillions de kilocalories)
Consommation d'énergie par habitant	26×10^6 Btu (6,5 millions de kilocalories)
Quantité de pétrole nécessaire à la production d'électricité	$0{,}35 \times 10^6$ tonnes
Production totale d'énergie électrique	$1{,}10 \times 10^9$ kWh
Production d'énergie électrique par habitant	647 kWh
Puissance installée totale . .	240 mégawatts
Puissance installée par habitant	141 watts

Le tableau 1 permet de comparer les chiffres se rapportant à Israël avec ceux qui concernent un certain nombre d'autres pays dont le chiffre de population est compris entre 1,5 et 6 millions ainsi que quelques-uns des pays voisins. Tous les chiffres sont relatifs à l'année 1953 [1]*.

* Les numéros entre crochets renvoient à la bibliographie qui figure à la fin du mémoire.

Tableau 1

Production annuelle d'énergie électrique et puissance installée en divers pays en 1953 (chiffres cités dans l'ordre de progression décroissante de la « Production annuelle par habitant »)

Pays	Population (1 000)	Production (millions de kWh)	Puissance installée (1 000 kWh)	Production annuelle par habitant (kWh)	Puissance installée par habitant (watts)
Norvège	3 327	19 140	3 500	5 750	1 052
Suisse	4 884	13 600	3 310	2 790	678
Nouvelle-Zélande .	2 047	3 750	800	1 832	391
Finlande	4 140	5 244	1 475	1 265	356
Chili	5 932	3 600	1 000	608	169
Israël . . . 1953	1 670	900	190	539	114
1955	1 750	1 275	240	729	137
Porto-Rico	2 214	825	200	372	90
Uruguay	2 353	750	250	320	106
Grèce	7 776	950	260	122	33
Maroc	8 000	925	250	115	31
Syrie et Liban . . .	4 701	290	90	62	19
Égypte	21 425	1 200	450	56	21
Turquie	22 461	1 210	502	54	22
Irak	5 100	200	60	39	12

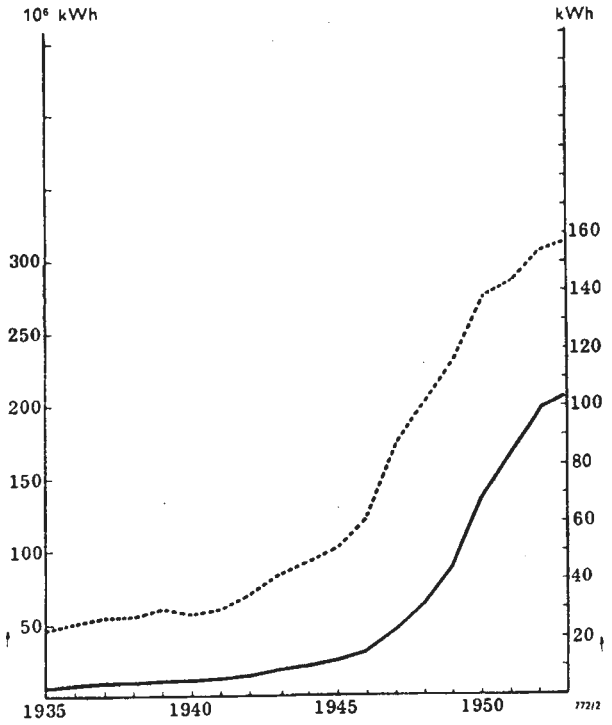
Les figures 2, 3, 4 et 5 indiquent, pour l'État d'Israël, la consommation respective d'électricité pour les usages domestiques, commerciaux et industriels, et pour l'alimentation en eau des villes.

L'irrigation nécessite une grande quantité d'énergie électrique et ce fait constitue l'une des caractéristiques importantes de la consommation d'énergie en Israël. En fait, le pompage de l'eau pour l'irrigation absorbe environ un tiers de l'énergie électrique du pays. Il serait utile d'ajouter quelques mots à ce sujet.

L'ambitieux programme d'irrigation d'Israël ne dépend pas seulement du pompage de l'eau disponible; il implique de réussir à trouver de nouvelles méthodes de distribution d'eau et de nouvelles sources d'eau douce.

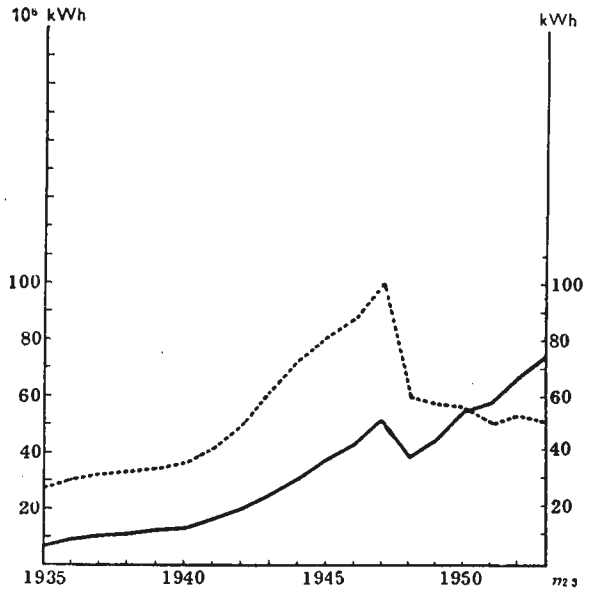
1. Outre une meilleure utilisation de l'eau de pluie, on étudie les possibilités d'utiliser la rosée qui, pendant les mois d'été, se dépose en quantité appréciable. Depuis des siècles, on recueille d'une manière primitive la rosée dans des bassins spéciaux; les expériences menées actuellement pour améliorer ces méthodes et, d'une manière générale, pour déterminer l'importance de la rosée dans la vie des plantes, ont donné des résultats encourageants.

2. On étudie actuellement quels sont les besoins minima en eau des principales cultures d'Israël, car il semble que les méthodes d'irrigation actuellement utilisées (dans le monde entier et pas seulement en Israël) fournissent à la plante des quantités d'eau qui excèdent de beaucoup ses besoins réels. Certains des résultats obtenus peuvent présenter un intérêt général [2].



Ordonnée de gauche : 10^6 kWh (———).
Ordonnée de droite : kWh (- - - - - -).

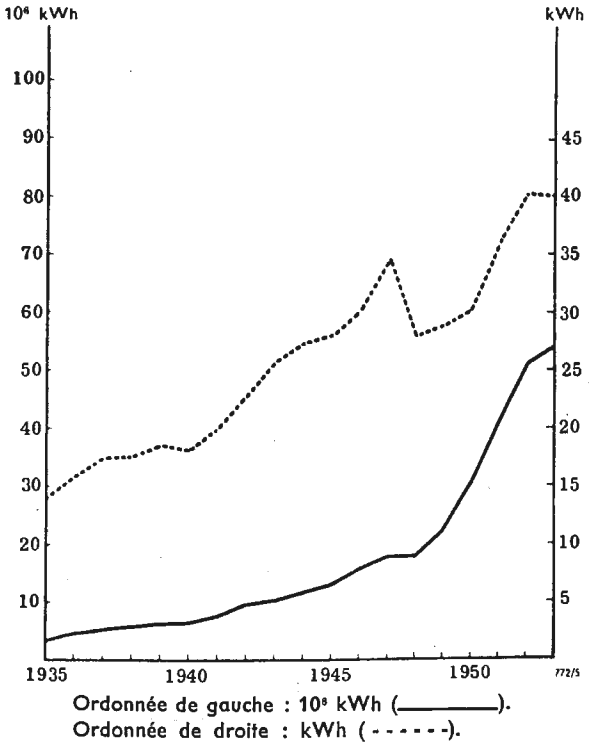
Figure 2. — Consommation d'électricité totale (———) et par habitant (- - - - -); usages domestiques.



Ordonnée de gauche : 10^6 kWh (_____).
Ordonnée de droite : kWh (- - - - - -).

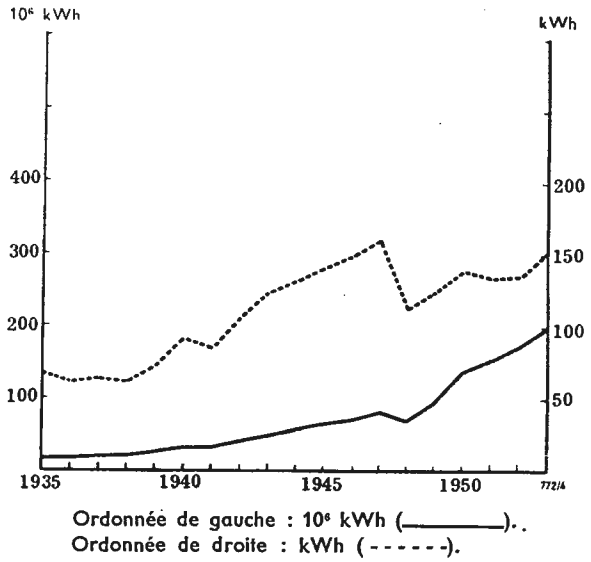
Figure 3. — Consommation d'énergie électrique totale (_____) et par habitant (- - - - - - - -); usages commerciaux.

L'un des facteurs déterminants est la période pendant laquelle le taux d'humidité du sol qui entoure la racine est maintenu au-dessus d'un certain niveau (14 pour cent pour les pommes de terre, 13 pour cent pour un maïs hybride



Ordonnée de gauche : 10^6 kWh (_____).
Ordonnée de droite : kWh (- - - - - -).

Figure 5. — Consommation d'énergie électrique totale (_____) et par habitant (- - - - - - - -); alimentation en eau des villes.



Ordonnée de gauche : 10^6 kWh (_____).
Ordonnée de droite : kWh (- - - - - -).

Figure 4. — Consommation d'énergie électrique totale (_____) et par habitant (- - - - - - - - -); usages industriels.

tardif, ce qui correspond à une tension de l'eau d'environ 0,5 atmosphère). D'une importance égale est le fait que les besoins saisonniers pour l'irrigation, w_1, dépendent de la quantité optimum des applications individuelles d'eau, w. On a pu démontrer une relation semi-empirique :

$$w_1 = \frac{A}{1 - \frac{B}{w}}$$

où A et B sont des constantes qui peuvent être déterminées en se fondant sur les données statistiques courantes en matière d'irrigation. On a constaté que la quantité d'eau nécessaire pour assurer un rendement maximum est de 350 mm pour les pommes de terre et de 400 mm pour le maïs hybride.

3. Une station expérimentale est maintenant en activité pour étudier le dessalement de l'eau salée. On y applique la méthode des membranes semi-perméables pour les échanges ioniques.

4. Dans le cadre d'un projet à beaucoup plus long terme, on s'efforce d'améliorer, tant du point de vue de la thermodynamique que de la mécanique, les techniques actuelles de dessalement par congélation partielle. Par de nouvelles méthodes d'absorption ou d'échange de chaleur et grâce à la production de cristaux de glace suffisamment petits, on espère pouvoir accroître le rendement de cette technique et réduire le coût du dessalement.

5. En essayant de résoudre différemment le problème de l'eau saumâtre, on a été amené à étudier la question de savoir dans quelle mesure on pouvait éviter les effets nuisibles du chlorure de sodium sans effectuer de dessalement, par exemple, en dosant en conséquence les autres éléments nutritifs que reçoit la plante sous forme d'engrais

chimiques, principalement ceux qui sont peu solubles [3]. Les premiers résultats semblent encourageants.

L'irrigation, bien qu'importante, ne constitue toutefois, dans l'économie de l'État d'Israël, qu'un des secteurs de consommation d'énergie. Les plans actuels, en ce qui concerne les industries électrochimiques et électrométallurgiques, ainsi que l'extension prévue de certains secteurs de l'industrie tels que ceux de l'alimentation et du textile (qui va de pair avec l'élévation du niveau de vie), impliquent également un accroissement des besoins en énergie électrique.

Prévisions pour 1964

On prévoit que :

1) le chiffre de la population atteindra, en 1964, 2 600 000 habitants;

2) le taux d'accroissement de la consommation totale de combustible — production d'électricité mise à part — sera proportionnel à l'augmentation de la population (coefficient : $\frac{2,6}{1,7} = 1,53$), ce qui représente une estimation très prudente;

3) pour évaluer la puissance installée, on peut admettre que le facteur de charge est égal à 55;

4) les besoins de l'irrigation ne seront pas très différents par unité de superficie (le dounam*, en Israël) de ce qu'ils sont aujourd'hui;

5) la construction des grandes entreprises industrielles actuellement en projet sera alors achevée et, par conséquent,

6) l'accroissement de la production d'électricité se maintiendra à son taux actuel (doublement en quatre ans) jusqu'en 1964, c'est-à-dire qu'il se poursuivra après l'expiration de la période de cinq ans pour laquelle une étude détaillée du marché a été effectuée.

En ce qui concerne la troisième hypothèse, il faut noter le fait suivant : l'immigration en Israël est probablement appelée à diminuer par rapport à ce qu'elle est aujourd'hui; mais, d'autre part, les besoins en énergie électrique pour 1954 ne représentent pas exactement le pouvoir de consommation de la population, car un grand nombre des récents immigrés ne peuvent encore utiliser au maximum l'énergie électrique pour leurs besoins domestiques ou pour leurs activités industrielles ou agricoles. La Palestine Electric Corporation a étudié en détail les ventes de courant électrique prévues pour les années 1955-1959, en tenant compte de la mesure dans laquelle les nouvelles applications de l'électricité seront adoptées dans le secteur ménager et dans l'agriculture; du développement des activités industrielles et de la mise en exploitation de certaines régions; de la tendance de l'emploi et de l'évolution du revenu personnel; enfin, du développement probable du commerce extérieur. Les résultats auxquels a abouti cette étude sont résumés dans le tableau 2; ils montrent que l'on peut effectivement s'attendre à ce que les ventes de courant électrique doublent au cours de la période 1955-1959.

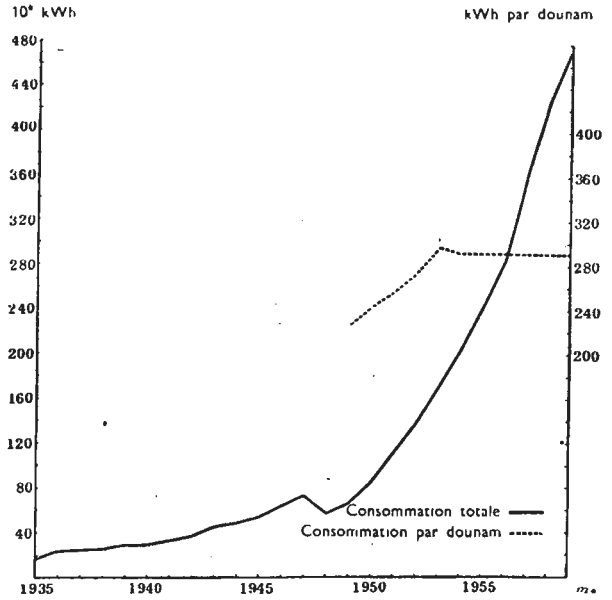
Tableau 2

Estimation des ventes annuelles de courant électrique

(En millions de kWh)

Type d'utilisation	1955	1959
Usage domestique	285	530
Usage commercial (y compris l'éclairage des rues)	125	210
Usage industriel	325	700
Irrigation et alimentation en eau des villes	320	660
TOTAL	1 055	2 100

Quant à la quatrième hypothèse, elle représente une estimation prudente, basée sur la figure 6, qui résume la consommation totale d'énergie électrique pour l'irrigation et la consommation par dounam au cours des vingt dernières années. Ce document revêt la plus haute importance, car, au cours des dix prochaines années, Israël espère porter la superficie des terres agricoles irriguées de 750 000 à 3 600 000 dounams (75 000 hectares à 360 000 hectares).



Ordonnée de gauche : 10^6 kWh (_____).
Ordonnée de droite : kWh (- - - - - - - -).
1 dounam = 1 000 m².

Figure 6. — Consommation d'énergie électrique pour l'irrigation.

* 1 dounam = 1 000 m² environ.

Il y a lieu de noter (cela peut présenter un intérêt général) qu'avec la tendance actuelle à transporter l'eau nécessaire à l'irrigation à des distances relativement longues, le nombre de kilowattheures consommés par dounam irrigué augmente régulièrement. Mais la quantité d'eau consommée par dounam qui dépasse celle que requièrent les conditions biologiques et économiques optima, ira vraisemblablement en diminuant; aussi peut-on raisonnablement espérer d'ici quelque temps un ajustement du nombre de kilowattheures par dounam.

On arrive ainsi aux prévisions suivantes pour 1964 :

Nombre d'habitants	2 600 000
Consommation totale d'énergie	$3{,}1 \times 10^6$ tonnes de pétrole = $12{,}4 \times 10^{13}$ Btu (30 trillions de kilocalories)
Consommation d'énergie par habitant	45×10^6 Btu (11 millions de kilocalories)
Quantité de pétrole nécessaire à la production d'énergie électrique	1 800 000 tonnes
Production totale d'énergie électrique	$6{,}3 \times 10^9$ kWh
Production d'énergie électrique par habitant	2 423 kWh
Puissance installée	1 300 mégawatts
Puissance installée par habitant	503 watts

Ces chiffres ne paraissent pas excessifs. Malgré la grande quantité d'énergie électrique requise par l'irrigation, il est permis de croire qu'en 1965 la production israélienne d'énergie par habitant sera assez proche de celle des États-Unis d'Amérique (2 920 kWh) ou de la Suisse (2 533 kWh).

SOURCES D'ÉNERGIE

Aujourd'hui, le pétrole est pratiquement la seule source d'énergie sur laquelle soit fondée l'économie d'Israël. Dans les prévisions que nous venons de donner, il a été admis que cette situation ne subirait aucun changement d'ici 1964. Le fait que la totalité du pétrole actuellement consommé soit importée préoccupe vivement le gouvernement.

Des études géologiques et géophysiques ont permis de conclure à la possibilité de trouver de l'huile minérale en Israël. Les premiers sondages ont déjà été entrepris, mais on ne peut évidemment pas prévoir leurs résultats.

L'étude géologique du pays effectuée au cours de ces dernières années a permis de découvrir un très grand nombre de dépôts de schiste bitumineux. Toutefois, ce schiste n'est pas de très bonne qualité (13 pour cent de son poids en huile). On étudie actuellement la possibilité de l'exploiter, tant en vue de la production d'énergie que comme matière première pour l'industrie chimique. Cette perspective pourrait devenir plus intéressante si l'on envisageait de produire, par pyrolyse, à la fois de l'huile et du sulfure d'hydrogène; on a remarqué, en effet, que la distillation sèche du schiste libérait un gaz contenant 50 pour cent d'hydrogène sulfuré.

On a beaucoup discuté, sur le plan international, la question de la production d'énergie hydroélectrique en Israël. Les plans israéliens comportent l'établissement, d'ici 1964, de centrales hydrauliques qui fourniraient environ 80 mégawatts. Dans la conjoncture politique actuelle, il semble bien que ce soit un projet limite, mais il est réalisable.

Au cours de ces dernières années, on a étudié la possibilité d'utiliser le vent comme source d'énergie électrique, et, de fait, quelques centrales expérimentales utilisant l'énergie éolienne sont aujourd'hui installées dans le pays. Cependant, leur intérêt demeurera local, et l'on ne peut compter qu'elles contribuent grandement à résoudre le problème.

En revanche, on espère que l'utilisation de l'énergie solaire deviendra un élément important de la production d'énergie en Israël. Le rayonnement solaire est si abondant d'un bout de l'année à l'autre — surtout dans la partie méridionale du pays — que cette source d'énergie semble particulièrement intéressante. Les hommes de science israéliens ne se contentent pas de suivre attentivement les progrès réalisés en ce domaine par d'autres pays; ils ont essayé d'y apporter leur propre contribution [4]. (Un compte rendu de leurs travaux est joint à ce mémoire.) C'est un fait reconnu que le faible rendement (environ 5 pour cent) de tous les procédés connus de conversion de l'énergie solaire en énergie mécanique est dû aux pertes de chaleur dans le collecteur, qui ne peuvent être compensées qu'en partie par le recours à des miroirs de concentration. Ces pertes sont dues au rayonnement du « corps noir » utilisé pour absorber le maximum de l'énergie solaire incidente. Si l'on pouvait construire un collecteur qui soit un bon absorbeur (et émetteur) de la lumière solaire (longueur d'onde supérieure à 2 microns), mais un mauvais émetteur des radiations de longueur d'onde inférieure à 2 microns, il serait possible d'obtenir de beaucoup plus hautes températures du collecteur. Certains dispositifs à cette fin ont donné des résultats encourageants.

Toutefois, même si dans toutes les régions où se poursuivent actuellement des travaux de recherche et de mise en valeur, les estimations étaient des plus optimistes, et même en supposant qu'une coopération internationale à cet égard soit prochaine, Israël ne saurait établir ses programmes de développement en se basant uniquement sur ces possibilités; cet État doit rechercher une source d'énergie nouvelle et originale, à savoir l'énergie atomique. Toutefois, comprenant qu'un pays aussi petit ne peut embrasser dans leur totalité les problèmes

relatifs à l'énergie atomique, et cela d'autant moins que ses savants et ses techniciens ont à résoudre une multitude d'autres problèmes urgents, Israël s'est jusqu'ici limité à l'étude de la production locale de deux matières premières importantes à cet égard : l'uranium et l'eau lourde.

En ce qui concerne l'eau lourde, une difficulté essentielle résidait dans le fait que sa production nécessite en général de l'énergie électrique (par exemple, lorsqu'on recourt à la méthode électrolytique). On a essayé de tourner la difficulté en utilisant une méthode thermique (distillation fractionnée) d'enrichissement de l'eau lourde, tant sur le plan du laboratoire que sur le plan semi-industriel. A cet égard, l'étude des problèmes fondamentaux du fractionnement isotopique et des questions relatives à la conservation de la chaleur a été couronnée de succès. Certains des résultats de ces recherches [9] font l'objet de communications qui seront présentées dans une autre série de séances de cette Conférence.

Quant à l'uranium, les recherches ont été menées en Israël en supposant que l'utilisation mondiale de l'énergie atomique nécessiterait l'emploi de minerais d'uranium moins riches que ceux actuellement employés. Le Comité israélien pour l'énergie atomique a eu la chance de trouver un minerai propre à une étude de ce genre dans les roches phosphatées du Néguev, qui appartiennent à la série des minerais uranifères contenant de 0,1 à 0,01 pour cent du précieux élément. Nous avons mis au point diverses techniques pour extraire l'uranium en tant que sous-produit de la fabrication d'engrais phosphatés; plus précisément, nous avons conçu, pour chacun des procédés utilisés actuellement dans l'industrie des engrais phosphatés, une méthode d'extraction *ad hoc*, qui n'exige aucune modification importante de ces procédés. L'intérêt de ces techniques peut s'étendre par la suite, car d'autres roches phosphatées de même origine géologique sont également susceptibles de contenir de l'uranium. On devrait pouvoir appliquer les mêmes procédés, sans grande difficulté, à des minerais autres que les roches phosphatées.

Israël n'ignore certes pas qu'entre la production d'uranium et d'eau lourde et une centrale atomique, un chemin long et difficile reste à parcourir, mais notre programme de recherche est fondé sur la conviction que tous les pays du monde finiront par s'unir pour résoudre les grands problèmes d'ordre matériel qui se posent aujourd'hui à l'humanité : le problème alimentaire et celui de la production d'énergie. Notre État attend beaucoup de la présente Conférence, et il espère qu'elle décidera de rendre publiques les informations techniques que des nations trop petites ou trop pauvres ne pourraient obtenir par leurs propres moyens. Notre quote-part à cette œuvre commune résiderait dans la communication de renseignements sur l'expérience que nous avons acquise touchant les méthodes de production d'eau lourde et d'uranium. De telles données, nous le croyons, pourraient contribuer grandement à rendre l'énergie atomique d'usage universel, c'est-à-dire à améliorer les conditions économiques et les standards de vie, et faciliter de ce fait le règne de la paix dans le monde.

BIBLIOGRAPHIE

1. Tous les chiffres (à l'exception de ceux qui concernent Israël) sont tirés du Annual Report of the U. S. Federal Power Commission, 1954, cités dans Edison Electric Institute's « Data of Interest », avril 1955.
2. Étude effectuée par Rubin J., Feldman S. et leurs collaborateurs à la Station de recherches agricoles de Réhovot, Israël, grâce au concours de la Fondation Ford.
3. Mibashan A., *Survey of Literature on the Influence of Ions on Plants and Soils*, 1948 (Département de la recherche scientifique et industrielle, Jérusalem).
4. Tabor H., *Selective Radiation*, Vues nouvelles sur l'exploitation de l'énergie solaire (voir Appendice).
5. Dostrovsky I. et Lehrer Y., *The Design of Isotope Separation Plants : Some Basic Design Equations for the Distillation Process.*

APPENDICE

par H. Tabor*

VUES NOUVELLES SUR L'EXPLOITATION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE PAR LA MÉTHODE DE LA SÉLECTION DES RAYONNEMENTS

Si l'on considère l'ensemble des tentatives de l'homme pour convertir le rayonnement solaire en énergie mécanique, on s'aperçoit que l'on peut attribuer le faible rendement qu'elles ont permis d'obtenir au total — rendement de l'ordre de 5 pour cent — aux pertes de chaleur qui se produisent dans le système collecteur. Ces pertes empêchent la turbine d'atteindre une température convenable, à moins d'utiliser des miroirs de concentration de haute précision, fort coûteux.

Le rayonnement du récepteur, qui est noirci afin d'absorber le maximum de l'énergie solaire incidente, constitue le principal facteur de perte. Il est possible de calculer la plus haute température à laquelle puisse parvenir ce « corps noir » pour un degré fixe de concentration de l'énergie solaire captée; mais, en ce qui concerne la production d'énergie, les résultats sont décevants.

Par ses propriétés de sélection, cette surface réceptrice noircie constitue pour la lumière solaire ($\lambda < 2\ \mu$) un bon absorbeur (et émetteur) mais un mauvais émetteur pour le rayonnement thermique ($\lambda > 2\ \mu$); une telle surface atteindra donc une température beaucoup plus élevée si on la soumet au rayonnement solaire.

* Laboratoire national de physique, Conseil de la recherche scientifique de l'État d'Israël.

Nous citerons trois méthodes équivalentes pour obtenir une faible « émittance » de la surface du récepteur; la première consiste en un traitement spécial du vitrage recouvrant cette surface, cependant que la troisième utilise un nouveau dispositif optique : le « Solartrap » (« Piège à soleil »).

Nous indiquerons un certain nombre de moyens pour aborder la recherche en matière de surfaces de sélection. Une méthode au moins donne des résultats encourageants : le dépôt électrolytique d'une mince couche noire, transparente aux ondes thermiques.

Du point de vue mécanique, un sélecteur satisfaisant, ayant une « émittance » d'environ 0,10 ou moins pour le rayonnement thermique et un coefficient d'absorption de 0,80 à 1,0 dans le spectre solaire, permettra de parvenir aux températures de travail de 400 à 500 °C (dans des conditions d'ensoleillement normal et avec un facteur de concentration de 15 à 20), avec seulement une faible perte par rayonnement secondaire.

Exposé du problème

Pour obtenir un bon rendement dans la conversion de l'énergie solaire en énergie mécanique ou électrique au moyen d'un moteur thermique, il faut une température de collection de l'ordre de 400 à 600 °C. De telles températures ne pouvaient être obtenues dans les premiers types d'appareils, car ceux-ci nécessitaient l'emploi de miroirs paraboliques de haute précision, qui coûtent trop cher pour être utilisés en vue de la production d'énergie; leur emploi est pourtant quelquefois justifié en expérimentation, pour la production de très hautes températures.

Les systèmes qui ne comportent pas de miroir de concentration, ou qui utilisent des miroirs paraboliques cylindriques d'un pouvoir de concentration modéré, sont d'un faible rendement en raison des pertes qui se produisent dans le récepteur, lequel est constitué par une plaque ou un tube métallique noirci placé au foyer d'un système de concentration. Ces pertes, qui augmentent rapidement avec l'élévation de la température, contraignent l'inventeur à utiliser des moteurs thermiques à température peu élevée, et, de ce fait, le rendement est forcément restreint. On peut réduire les pertes en utilisant un ou plusieurs vitrages superposés suivant le principe de la serre chaude, mais, dans la plupart des cas, l'emploi de plus de deux de ces vitrages n'apporte aucune amélioration, en raison des pertes par absorption et par réflexion des vitrages eux-mêmes. On a essayé autrefois de réduire ces pertes en entourant le récepteur d'une chemise dans laquelle avait été fait le vide, mais ce système n'améliore que très peu le rendement; les calculs montrent en effet que, dans le récepteur, la perte principale est due au rayonnement secondaire et non à la convexion.

Pertes d'énergie

La formule suivante permet de calculer la perte ($q_{e\,(T)}$) par unité de surface d'un corps chauffé, de pouvoir émissif E_0 à la température absolue T_0, entouré d'une enceinte de pouvoir émissif E_1 à la température T_1, l'enceinte étant légèrement plus grande que le corps :

$$q_{e\,(T)} = C^1 (T_0 - T_1)^{5/4} + \frac{1}{\frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} - 1} \times \sigma (T_0^4 - T_1^4)$$

Dans cette formule, C^1 est le coefficient de perte par convexion, connu pour des formes géométriques simples telles que des plaques planes ou bien des cylindres horizontaux, et σ est la constante de Stephan-Boltzmann.

L'expression $\frac{1}{\frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} - 1}$ s'appellera « émittance effective » ou, plus simplement, l'« émittance » du corps *entouré de son enceinte* et sera représentée par E_e. D'ordinaire, l'enceinte est en verre, dont on admet en général que le pouvoir émissif est $E_1 = 0{,}96$.

Lorsque, dans l'équation, on remplace les lettres par leur valeur, on remarque que le rayonnement n'est que légèrement supérieur à la convexion pour de petits écarts de température ($T_0 - T_1$), mais qu'il augmente considérablement lorsque la température T_0 s'accroît.

On peut réduire les pertes : *a*) en augmentant T_1, la température du vitrage, ce que l'on obtient en superposant des vitrages supplémentaires; deux vitrages semblent cependant réaliser les conditions optima, sauf si le verre a subi un traitement préalable pour annuler la réflexion; *b*) en diminuant la perte par convexion par l'installation d'une chemise où a été fait le vide; *c*) en diminuant l'« émittance » $E_e = \frac{1}{\frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} - 1}$

Le présent rapport traite de cette dernière possibilité : la diminution de l'« émittance » effective du récepteur.

Sélection des rayonnements

Il ne semble pas, à première vue, que l'on puisse discuter l'équation se rapportant à l'« émittance » $\frac{1}{\frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} - 1}$, puisqu'elle est basée sur le pouvoir émissif du verre, qui est une constante, et sur celui du récepteur qui, ayant été intentionnellement noirci pour augmenter son pouvoir d'absorption d'énergie solaire, a un pouvoir émissif sensiblement égal à 1. Il n'est donc pas étonnant que l'ample documentation relative aux dispositifs à énergie solaire ne fasse autant dire aucune mention des possibilités de réduire les pertes par rayonnement.

Or, nous allons démontrer que l'on peut, théoriquement, réduire dans une assez grande proportion l'« émittance » effective (sans diminuer l'absorption de l'énergie solaire); des recherches expérimentales en cours confirment les possibilités prévues dans ce sens par la théorie.

Le rayonnement du soleil, tel qu'il est reçu sur la terre, et le rayonnement issu des corps terrestres chauffés, diffèrent sur deux points principaux : la longueur d'onde et le front d'onde. On peut exploiter ces différences, soit par une discrimination des longueurs d'onde (filtres), soit par une discrimination des fronts d'onde (système optique).

Discrimination des longueurs d'onde

Le rayonnement solaire qui atteint la surface de la terre se situe presque entièrement dans la bande des longueurs d'onde allant de 0,3 à 2,0 microns. D'autre part, d'après la loi de Planck sur le rayonnement et la loi de Wien sur le déplacement, le rayonnement thermique issu de corps chauffés jusqu'à 400 °C environ est presque entièrement compris dans les longueurs d'onde supérieures à 2 microns.

Donc, *le spectre du rayonnement solaire et celui du rayonnement thermique émis par des corps portés à une température de quelques centaines de degrés Celsius n'empiètent pas l'un sur l'autre de manière appréciable.*

Par conséquent, si l'on pouvait découvrir ou préparer des surfaces possédant des propriétés de sélection telles que, pour les longueurs d'onde inférieures à 2 microns, elles soient de bons absorbants, tandis que pour les longueurs d'onde supérieures à 2 microns, elles seraient de bons réflecteurs (donc, de mauvais émetteurs), ces surfaces — que l'on pourrait appeler *filtres sélectifs de réflexion-absorption* — permettraient d'obtenir des récepteurs à faible déperdition d'énergie solaire. Or, un grand nombre de raisons d'ordre physique portent à croire que l'on peut fabriquer de telles surfaces :

1. Les métaux polis sont de bons réflecteurs des ondes longues; on peut noircir leur surface par électrolyse, par des méthodes chimiques, ou encore en déposant la couche noire par galvanoplastie. Si la surface noire est assez mince pour laisser passer les ondes longues, le résultat désiré est atteint. Nous avons déjà préparé dans notre laboratoire des surfaces sélectrices par les trois procédés. Ainsi, du noir de nickel déposé par galvanoplastie sur une base de nickel poli a permis d'obtenir un pouvoir émissif de 11 pour cent, et, sur une base d'argent, un pouvoir émissif de 5 pour cent. De l'aluminium anodique, noirci chimiquement, a donné $E_0 = 12$ pour cent, et était stable à 450 °C.

2. Certains métaux comme l'argent et l'or, lorsqu'ils sont déposés en couche très mince, ont un pouvoir réflecteur bien plus faible dans le spectre visible que pour des longueurs d'onde plus longues, la couche étant en fait transparente dans le spectre visible. Si l'on dépose une telle couche sur un substratum *noir*, la surface sélectrice désirée est obtenue.

3. Certains métaux, tels que le tungstène, le molybdène et, dans une moindre mesure, l'acier, sont naturellement foncés, c'est-à-dire qu'ils absorberaient environ 50 pour cent de l'énergie solaire incidente à leur surface. Cependant, leur pouvoir émissif est très faible. Nous montrerons, dans une autre communication, que l'absorption effective de l'énergie solaire par une surface polie peut être grandement accrue en rayant la surface par une série de V — ce qui entraîne aussi une augmentation du pouvoir émissif effectif — si bien que l'on peut utiliser des surfaces de tungstène, molybdène, etc., comme récepteurs sélecteurs. En pratique, un dépôt extrêmement mince d'une telle matière sur une surface métallique suffira amplement.

4. Si, à partir d'un filament de tungstène, on évapore de l'or sous faible pression dans une atmosphère d'azote contenant un peu d'oxygène, l'or se dépose sous forme d'une mousse noire qui laisse passer les longueurs d'onde supérieures à 2 microns. Si l'or se dépose sur une surface métallique brillante, on peut alors obtenir un résultat semblable à celui dont il est question au paragraphe 1.

L' « émittance » effective étant également réduite par une diminution du pouvoir d'émission du vitrage, une autre méthode de préparation de surface sélectrice est basée sur ce fait. Il faut traiter la surface de verre de façon que, tout en demeurant transparente dans le spectre visible, elle ait un très grand pouvoir réflecteur pour le rayonnement à grande longueur d'onde. On pourrait l'appeler *filtre sélectif de transmission-réflexion.* Comme nous l'avons indiqué plus haut, au paragraphe 2, une très mince couche d'un métal tel que l'or, l'argent, etc., peut être très transparente dans le spectre visible tout en réfléchissant le rayonnement thermique. Ainsi, on a remarqué qu'un dépôt d'argent qui transmettait environ 40 à 50 pour cent d'énergie solaire, réfléchissait 90 pour cent du rayonnement thermique émis par un corps porté à 300 °C. Une perte de cet ordre dans la transmission constitue un inconvénient sérieux, mais il peut être intéressant néanmoins de poursuivre les recherches dans cette voie.

Discrimination des fronts d'onde

On peut distinguer, par des moyens optiques, le rayonnement solaire du rayonnement émis par des corps chauffés. En effet, le rayonnement du soleil est essentiellement un rayonnement à faisceaux parallèles (le front de l'onde plane forme un angle d'incidence variant d'environ 1/100 radian, ce qui correspond au diamètre angulaire du soleil vu de la terre), tandis que le rayonnement des corps chauffés est pluri-directionnel.

Un dispositif nouveau, du nom de « Solartrap », opère, par des méthodes optiques, la discrimination entre le rayonnement solaire et celui provenant des surfaces chauffées.

La face supérieure d'une lame de verre est cannelée de façon à former une série de lentilles cylindriques adjacentes dont la courbure est telle qu'elles rassemblent un faisceau parallèle de lumière incidente, tombant sur la face supérieure, en fines lignes de lumière situées *exactement dans le plan de la face inférieure de la lame.* La face inférieure, elle, est argentée sur toute sa surface, à l'exception de fentes étroites ménagées en face des foyers des lentilles cylindriques formées sur l'autre face. Ainsi, le rayonnement solaire qui tombe normalement sur la face supérieure de la lame de verre la traversera en totalité (dans le verre, les pertes usuelles par absorption et par réflexion sont négligeables) et

émergera, par les fentes étroites non argentées, sous forme de faisceaux de lumière divergente. Cependant, si l'on regarde cette lame de verre par sa face inférieure, elle apparaîtra comme un miroir presque parfait, puisqu'elle est presque entièrement argentée et que son pouvoir réflecteur est élevé, aussi bien dans la bande visible que dans la bande de l'infrarouge.

Soit b la partie non argentée, le pouvoir réflecteur est approximativement : r visible $= 0{,}93 - 0{,}89\ b$; et r infrarouge $= 0{,}98 - 0{,}94\ b$. Comme le pouvoir émissif effectif d'une surface est : $E = 1 - r$ infrarouge, $E = 0{,}02 + 0{,}94\ b$. Par exemple, si nous avons $b = \frac{1}{15}$, r visible $= 0{,}873$; r infrarouge $= 0{,}918$; $E = 0{,}082$.

Si l'on utilise une telle lame de verre pour recouvrir un récepteur d'énergie solaire dont le pouvoir émissif est, par exemple, $E_0 = 0{,}95$, l'« émittance » effective du récepteur revêtu de ce vitrage est

$$E_e = \frac{1}{\frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} - 1} = 0{,}079$$

alors qu'elle prend la valeur de 0,913 quand ce même récepteur est revêtu d'un vitrage normal d'un pouvoir émissif de 0,96.

Le « Solartrap » possède une propriété incidentelle extrêmement importante : il augmente de beaucoup l'absorption effective du récepteur vis-à-vis du rayonnement solaire, puisque toute radiation non absorbée par le récepteur, mais réfléchie par celui-ci, ira de ce fait frapper la face inférieure du « Solartrap », lequel, étant un bon réflecteur, renvoie la radiation au récepteur. On peut démontrer que si R est le pouvoir réflecteur du récepteur pour le rayonnement solaire, et r celle du « Solartrap », l'absorption effective du récepteur pour le rayonnement solaire est alors :

$$\text{Absorption effective } \alpha_e = \frac{1 - R}{1 - rR}$$

tandis que, sans le « Solartrap », $\alpha = 1 - R$. Si on rapproche autant que possible la valeur de r de l'unité, le coefficient d'absorption s'en trouve considérablement amélioré.

Le « Solartrap » décrit appartient au type à un seul vitrage. Pour l'usage pratique, nous proposons le modèle à deux vitrages. Il permet d'obtenir à l'extérieur une surface « propre » qui ne se couvrira pas de poussière, et une isolation supplémentaire créée par l'intervalle d'air d'une faible transmission de rayonnement. Si l'on fait le vide dans le dispositif du « Solartrap », le second vitrage peut être remplacé par une feuille d'aluminium perforée.

Le « Solartrap » ne requiert pas de montage héliostatique : s'il est tourné vers le sud, avec les « lentilles » orientées est-ouest, il suffit de régler l'inclinaison du système après quelques jours pour la faire correspondre aux changements intervenus dans le plan de l'écliptique. On peut aussi modifier la position de la seconde paroi par rapport à la première, de façon à permettre le changement de l'angle d'incidence. Il n'est pas possible d'utiliser le « Solartrap » avec des systèmes de focalisation d'une très grande ouverture angulaire, tels que de longues paraboles, puisqu'il dépend d'un cône étroit du rayonnement capté. On peut l'utiliser avec des lentilles ou des miroirs de petite ouverture angulaire, mais il est particulièrement indiqué pour des collecteurs à plaque plane, ne nécessitant pas de systèmes de concentration. Il va sans dire qu'il peut être utilisé pour les serres chaudes et pour le chauffage des habitations.

Considérations d'ordre pratique

Dans un autre article traitant des aspects mécaniques du même problème, nous exposerons plus complètement les considérations d'ordre pratique.

En posant les relations d'équilibre, on peut calculer le rendement théorique d'un collecteur d'énergie solaire utilisé conjointement avec une machine thermique idéale de Carnot; les machines thermiques réelles ont des rendements qui sont de 0,3 à 0,6 fois celui d'une machine de Carnot idéale.

Le maximum d'intensité de l'énergie solaire atteignant la surface terrestre par temps clair est d'environ 300 Btu par heure et par pied carré, c'est-à-dire approximativement 0,95 kWh par mètre carré. En Israël, l'énergie totale annuelle qui tombe sur un mètre carré de récepteur statique est environ de 2 440 kWh, tandis que si le récepteur est monté héliostatiquement, l'énergie totale annuelle est d'environ 3 700 kWh*.

Les calculs montrent que, pour des récepteurs non sélectifs :

a) Un récepteur à plaque plane avec un vitrage aura un rendement théorique optimum de 9,6 pour cent (au maximum d'ensoleillement) à 85 °C et ne collectera, à cette température, plus aucune énergie utile si l'insolation tombe au-dessous de 189 Btu par heure et par pied carré (environ 530 kilocalories au mètre carré). Le rendement réel serait vraisemblablement d'environ 3 pour cent au maximum d'ensoleillement.

b) Si l'on utilise deux vitrages, le rendement théorique optimum est de 11,9 pour cent à 116 °C. La puissance d'« obscuration » (valeur de l'insolation pour laquelle aucune énergie utile n'est collectée) est à peu près la même que précédemment.

c) Un récepteur cylindrique de 0,5 pied (15 cm environ) de diamètre (protégé par un vitrage) situé au foyer d'une parabole de 10 pieds (3,05 m) de diamètre, présente les caractéristiques suivantes : rendement théorique optimum : 15,7 pour cent à 182 °C; puissance d'obscuration : 162 Btu par heure et par pied carré (environ 430 kilocalories au m²); rendement réel : probablement 5 pour cent au maximum d'ensoleillement.

d) Un récepteur plan de 2 pouces de large (5 cm), situé au foyer d'une lentille cylindrique de 32 pouces de large (81 cm) — avec un vitrage de 4 pouces (10 cm) de large situé à 1 pouce ($2\frac{1}{2}$ cm) environ au-dessus du récepteur — présente les caractéristiques suivantes : rendement théorique optimum : 26,5 pour

* Ces données ne comprennent pas le rayonnement par diffusion. Avec des appareils sans dispositif de mise au point, il faut en outre tenir compte du rayonnement par diffusion qui est environ de 7 à 10 pour cent.

Tableau 3

Exemple *a* : Puissance de l'énergie solaire :
300 Btu par heure et par pied carré = 0,95 kWh/m² = 1,36 calorie par cm² et par minute.

	Récepteurs non sélectifs		Récepteurs sélectifs			
	Sans vide $E = 0,95$	Avec vide $E = 0,95$	Sans vide $E = 0,1$	Avec vide $E = 0,1$	Avec vide $E = 0,05$	Avec vide $E = 0,025$
Température de travail optimum . .	85 °C	95 °C	145 °C	254 °C	321 °C	402 °C
Rendement théorique (en pour cent)	9,6	11,2	16,5	28,3	34,6	40,0
Rendement réel estimé (en pour cent)	3	4	5	9	14	18
Puissance d'obscuration exprimée en Btu par heure et par pied carré . .	189	183	183	146	110	105

Tableau 4

Exemple *d* : Comparaison entre le cas où E = 0,95 et celui où E = 0,1.

	Non sélectif $E = 0,95$	Sélectif $E = 0,1$	
			[a]
Température de travail optimum	312 °C	481 °C	425 °C
Rendement théorique (en pour cent).	26,5	35,0	34,8
Rendement probable avec une machine de 6 000 kW (en pour cent)	8 à 9	16,1	16,0
Puissance d'obscuration exprimée en Btu par heure et par pied carré	150	116	95

[a] Les données portées dans cette colonne montrent qu'en travaillant légèrement au-desous des conditions de rendement optimum, le collecteur continue à fonctionner à des puissances d'insolation beaucoup plus basses.

cent à 312 °C; puissance d'obscuration : 150 Btu par heure et par pied carré (environ 400 kilocalories au m²); rendement réel : probablement 8 à 9 pour cent au maximum d'ensoleillement.

Les exemples *a*), *b*) et *c*) correspondant aux systèmes prévus permettent un rendement pouvant atteindre 5 pour cent, soit 20 m² d'insolation par kW installé. L'exemple *d*) permettrait une légère amélioration, mais on n'a pas encore pu utiliser les lentilles cylindriques du type Fresnel. Les techniques modernes rendront sans doute leur usage possible.

Afin de voir jusqu'à quel point l'utilisation d'un récepteur sélectif pourrait améliorer les conditions d'exploitation de l'énergie solaire, on a étudié à nouveau les exemples *a*) et *d*) dans le cas de récepteurs sélectifs doués d'un faible pouvoir émissif. De plus, vu l'importance des pertes par convexion lorsque les pertes par rayonnement ont été réduites, on a reconsidéré le cas de l'exemple *a*) en prévoyant un vide poussé dans l'intervalle situé entre le récepteur et le vitrage. (Tableaux 3 et 4.)

L'influence du vide est faible sur les récepteurs non sélectifs mais devient très importante dans le cas des récepteurs à faible pouvoir émissif. La diminution du pouvoir émissif a des effets très marqués.

Le récepteur sélectif a un rendement infiniment meilleur. L'obtention d'un rendement semblable avec un récepteur non sélectif exigerait que le pouvoir de concentration du système optique soit environ cinq fois plus grand, c'est-à-dire égal à environ 80, ce qui, en pratique, serait très difficile à réaliser dans des conditions économiques.

Cet exemple incite à penser qu'un récepteur sélectif d'un pouvoir émissif de 0,1 au maximum, pourrait servir de base pour la construction d'un modèle rationnel qui aurait un rendement de 16 pour cent lorsqu'il actionnerait une turbine à vapeur classique. La même turbine, actionnée par une chaudière à combustible classique, donne un rendement total de 22 pour cent. Le collecteur du four solaire devrait avoir une superficie d'environ 7 m² par kW maximum installé.

Conclusions

Nous avons de bonne raisons de croire qu'en dehors des possibilités que présente le « Solartrap », la recherche permettra de réaliser des surfaces qui, tout en paraissant noires, auront de faibles pouvoirs émissifs à des températures de quelques centaines de degrés Celsius, et que de telles surfaces permettront de construire des moteurs à énergie solaire d'un haut rendement, sans nécessiter pour autant des pouvoirs de concentration supérieurs à 16-20.

La demande italienne d'énergie en 1975 et en l'an 2000 et le rôle possible de l'énergie électronucléaire en Italie au cours du prochain demi-siècle

par Francesco Giordani *

AVANT-PROPOS

Les données statistiques disponibles sur les consommations d'énergie de notre pays au cours de ce dernier quart de siècle permettent de risquer, par l'intermédiaire d'une extrapolation attentive, quelques prévisions sur les consommations futures. Il est nécessaire, à cet effet, d'examiner les caractéristiques des années susceptibles d'être choisies comme base de calcul, afin de tenir dûment compte, dans la mesure du possible, de tel ou tel événement particulier qui s'est produit et qui a pu influer de façon sensible sur l'allure des consommations. Malheureusement, à partir de 1911, une série d'événements exceptionnels (guerres, crises économiques, restriction des échanges, politiques d'autosuffisance, etc.) se sont succédé en Italie comme à l'étranger, altérant le rythme des phénomènes économiques. Si l'on remarque toutefois que les périodes dominées par des actions de dépression ont été en général suivies de périodes de récupération et de reprise, on est conduit à estimer que le choix d'un intervalle de temps suffisamment long comme période de base constitue le meilleur expédient pour entreprendre une extrapolation raisonnable.

Sur la base de ces critères, et étant donné la nécessité de choisir des années pour lesquelles on dispose de données statistiques sûres et suffisamment détaillées pour les différentes catégories de consommation, nous avons fixé notre attention sur la période 1931-1954.

La Commission ministérielle d'étude des problèmes de la production et de la distribution de l'énergie électrique nommée par le Ministère italien de l'industrie et du commerce et présidée par M. Santoro, Conseiller d'État, a effectué en juin 1954 une évaluation de la demande italienne d'énergie jusqu'en 1960, qu'on peut considérer comme étant digne de foi. Devant se borner à avancer des prévisions jusqu'en 1960, ladite Commission a estimé raisonnable de prendre pour base les données concernant la consommation des années 1950 à 1953, au cours desquelles on a l'impression que les accroissements ont repris leur valeur normale, par suite de la disparition du phénomène typique d'accélération dû à la récupération de l'après-guerre. Malgré l'intérêt d'une pareille étude, nous n'avons pas jugé possible de l'utiliser aux fins d'une extrapolation jusqu'à l'an 2000, car il est difficile d'obtenir des valeurs dignes de foi pour la demande énergétique d'une longue série d'années futures sur la base de données se rapportant à une période si courte (3 ans), surtout si ladite période ne peut être envisagée avec une certitude absolue comme normale.

Si aucun autre élément ou phénomène secondaire n'intervient qui altère profondément le développement du phénomène principal, les facteurs déterminant la variation de consommation énergétique s'énumèrent comme suit : *a*) variation naturelle du chiffre de population; et *b*) variations du degré d'industrialisation, du degré de mécanisation et du standard de vie en général.

Passons à un examen rapide de l'allure de ces deux facteurs en Italie pendant les périodes qui nous intéressent.

a) Population

Le fait que la population italienne s'achemine vers un maximum (qui sera sans doute atteint dans un petit nombre d'années) nous oblige à tenir compte séparément de l'influence exercée par l'accroissement de population. D'où la nécessité d'étudier le développement des consommations sur la base des valeurs *per capita*, en utilisant ensuite les prévisions sur l'évolution de la population pour remonter aux valeurs globales.

Après l'étude effectuée entre les deux guerres, sur l'initiative de la Société des Nations, sur l'évolution de la population italienne — étude désormais dépassée par les événements — une nouvelle enquête a été faite sur la question par Giuseppe De Meo, qui a poussé ses prévisions jusqu'à 2001 (*Popolazione e forze del lavoro*, S.V.I.M.E.Z, Rome, 1952).

Cette enquête développe différentes hypothèses sur l'allure des taux de fécondité, de mortalité et de mouvement migratoire. Nous avons choisi, de notre

* Président du Comité national des recherches nucléaires.

côté, celle que l'auteur considère comme « hypothèse intermédiaire » et qui prévoit que le maximum sera atteint en 1985. Dans le tableau suivant, nous indiquons les valeurs calculées, d'après cette hypothèse, pour la population italienne, exprimées en milliers d'âmes; ces chiffres s'entendent pour les habitants vivants au début de l'année considérée. Nous avons indiqué également les chiffres réels des années 1931 et 1954.

Année	*Population (en milliers d'âmes)*
1931	41 412
1954	47 800
1960	51 200
1965	52 430
1970	53 450
1975	54 000
1980	54 500
1985	54 630
1990	54 500
1995	54 210
2000	53 400

Pendant la période 1931-1954, choisie par nous comme base de départ, la population s'est accrue de 41 412 à 47 800 milliers d'habitants, ce qui équivaut à un coefficient annuel moyen d'augmentation de 0,626 pour cent.

b) Accroissement des consommations spécifiques

Par ordre d'importance, le deuxième facteur s'avère extrêmement complexe, en ce sens qu'il est malaisé de prévoir jusqu'à quel point et à quel rythme se poursuivra l'accroissement de la mécanisation et de l'industrialisation.

En ce qui concerne l'Italie, nous devons tenir compte du fait que la situation a été dominée jusqu'à présent par une très faible disponibilité de combustible et par une possibilité plus favorable de développement de la production d'énergie électrique, obtenue principalement à partir des chutes d'eau et des vapeurs naturelles.

Pour effectuer une extrapolation raisonnable, il vaut mieux répartir les consommations énergétiques en deux catégories, dont la première comprendra la consommation de combustibles à des fins principalement thermiques — autrement dit, toute la consommation servant à produire la force motrice. La seconde sera réservée aux disponibilités d'énergie électrique, y compris celle qui est produite par voie thermique.

En ce qui concerne la première catégorie, nous pouvons estimer que la consommation en question a été jusqu'à présent sujette à de telles restrictions que son point maximum est encore très éloigné; ce qui nous autorise à utiliser, pour les augmentations futures, le même taux géométrique annuel moyen que pour la période 1931-1954.

Par contre, en ce qui concerne la consommation d'énergie électrique, nous admettrons que la situation se développe de façon différente, c'est-à-dire que l'augmentation se produit à un taux annuel moyen identique à celui que nous avons constaté pendant la période choisie par nous comme base (première période allant jusqu'à 1960); nous admettrons ensuite que le taux géométrique annuel décroît progressivement dans le temps jusqu'à se réduire d'une quantité constante à la fin de chaque lustre, passant ainsi de 4,835 pour la période 1931-1960 à 4,035 pour la période 1931-2000.

CONSOMMATION ITALIENNE D'ÉNERGIE PENDANT LES ANNÉES 1931 ET 1954 ET TAUX D'ACCROISSEMENT

L'examen des statistiques de la période choisie donne, pour les consommations d'énergie des années 1931 et 1954, les valeurs mentionnées au tableau 1, où les quantités sont exprimées en unités de mesure caractéristiques des différentes sources.

Le mot « consommation » est improprement employé par nous dans le présent texte — sauf indication différente — pour désigner les quantités mises à la disposition des consommateurs. Dans chaque cas, la consommation est considérée sans déduction des chiffres d'autoconsommation des producteurs; pour les combustibles solides et les combustibles liquides, on ne tient aucun compte du mouvement des stocks de réserve, dont nous pensons qu'on peut négliger l'influence lorsqu'il s'agit de calculer la valeur des taux moyens sur une période de temps suffisamment prolongée.

En ce qui concerne l'énergie électrique, nous n'avons considéré que celle d'origine hydraulique et géothermique, afin d'éviter de tenir double compte de l'électricité d'origine thermique, produite aux dépens d'une partie des combustibles consommés, tels qu'ils sont classifiés au tableau 1.

Tableau 1

Consommation d'énergie de différentes sources

Année	Combustibles solides (en milliers de tonnes)	Combustibles liquides (en milliers de tonnes)	Gaz naturels (en millions de m³)	Énergie hydro + géoélectrique (en millions de kWh)
1931	11 279	1 334	12	10 233
1954	11 144	8 300	2 967	31 098

La classification du tableau 1 est nécessaire; nous avons signalé les motifs qui imposent une définition séparée de la loi d'accroissement de la consommation d'énergie électrique et de la loi selon laquelle augmente la consommation de combustible destiné à des fins purement thermiques.

Mais pour avoir une idée de la consommation d'ensemble, il nous faut donner aux grandeurs à additionner un caractère d'homogénéité en convertissant toutes les quantités en une unité de mesure unique, qui sera, suivant l'usage commun, la tonne de houille. L'équivalence est établie à l'aide des facteurs suivants :

Charbon étranger	1,00 kg/kg
Charbon italien	0,80 kg/kg
Pétrole brut	1,30 kg/kg
Produits pétroliers (coefficient moyen)	1,50 kg/kg
Méthane	1,23 kg/kg
Énergie électrique 1931 . .	0,70 kg/kWh
Énergie électrique 1954 . .	0,55 kg/kWh

Pour l'énergie électrique, l'équivalence théorique serait $\frac{860}{7\,200} = 0{,}12$ kg/kWh; mais nous avons employé comme référence la quantité de charbon, exprimée en kilogrammes, que nous présumions avoir été consommée en moyenne dans de bonnes installations à l'époque considérée. Nous admettons également une amélioration ultérieure du coefficient avec le temps, comme nous l'indiquerons au fur et à mesure, pour tenir compte : *a*) des nouvelles grandes centrales fonctionnant à pleine charge pendant un grand nombre d'heures; *b*) de l'usage croissant de l'huile combustible et du méthane en lieu et place des combustibles solides; *c*) du progrès technique général, grâce auquel les rendements continuent à s'améliorer.

D'après ce qui précède, nous avons obtenu les données du tableau 2, où les énergies des différentes sources sont toutes exprimées par leur équivalent en tonnes de houille :

Tableau 2

Consommations d'énergie des différentes sources, exprimées en milliers de tonnes d'équivalent de houille

Année	Combustibles divers				Énergie hydro + géoélectrique	Total général
	Solides	Liquides	Gazeux (méthane)	Total[a]		
1931 . . .	11 279	2 001	15	13 295	7 163	20 458
1954 . . .	11 144	12 450	3 650	27 244	17 104	44 348

[a] Voir tableau 3.

En déduisant des quantités de combustibles divers celles qui sont consommées aux fins de la production d'énergie thermoélectrique (respectivement 237 et 4 476 millions de kilowattheures en 1931 et en 1954), nous obtiendrons le montant de la consommation — toujours exprimée en tonnes équivalentes — destinée à des fins purement thermiques pendant les années que nous avons prises pour base. Les résultats des calculs ci-dessous sont groupés dans le tableau 3 :

Tableau 3

Consommation thermique d'ensemble (en milliers de tonnes d'équivalent de houille), déduction faite de la consommation servant à la production thermoélectrique

Année	Consommation totale (en milliers de tonnes) (*a*)	Énergie thermoélectrique			Consommation thermique nette (en milliers de tonnes) (*a* — *b*)
		En millions de kWh	Coefficients de conversion	Équivalent de houille (en milliers de tonnes) (*b*)	
1931	13 295	237	0,70	165	13 130
1954	27 244	4 476	0,55	2 460	24 784

En ajoutant aux quantités d'énergie géoélectrique et hydroélectrique mentionnées dans la dernière colonne du tableau 1 les quantités d'énergie thermoélectrique citées plus haut, nous obtiendrons

les valeurs totales ci-après :

1931 . . . 10 233 + 237 = 10 470 × 10^6 kWh
1954 . . . 31 098 + 4 476 = 35 547 × 10^6 kWh

A partir de ces valeurs et de celles de la dernière colonne du tableau 3, nous pouvons calculer les valeurs des taux moyens annuels d'accroissement des deux consommations : énergie électrique totale, consommation thermique nette.

Au cours des 23 années séparant 1931 de 1954, l'augmentation de la consommation thermique a atteint en valeur absolue 11 654 milliers de tonnes, ce qui correspond à un taux annuel moyen de 2,808 pour cent, tandis que l'accroissement de la consommation électrique a été, en valeur absolue, de 25 104 millions de kilowattheures, ce qui correspond à un taux annuel moyen de 5,461 pour cent. Afin de ne tenir compte que des accroissements dus au développement du standard de vie et au progrès technique national, il nous faut soustraire des taux ci-dessus indiqués celui de 0,626 pour cent qui tient compte, comme nous l'avons vu, de l'augmentation de population. Nous obtenons ainsi les taux annuels de 2 808 — 0,626 = 2 182 pour cent pour la consommation thermique, et de 5 461 — 0,626 = 4,835 pour cent pour la consommation électrique.

ÉVALUATION DE LA DEMANDE D'ÉNERGIE PENDANT LA PÉRIODE 1954-2000

La connaissance des taux d'accroissement ainsi déterminés nous permet d'évaluer les demandes en énergie prévisibles pour l'avenir.

Les données concernant, dans la dernière colonne du tableau 3, la consommation thermique pour d'autres fins que la production d'électricité correspondent à une consommation spécifique de 0,317 tonne par habitant en 1931 et de 0,518 tonne par habitant en 1954. La série complète de ces consommations, de 5 ans en 5 ans jusqu'en l'an 2000,

Tableau 4

Demande probable de combustibles pour usages thermiques, exprimée en milliers de tonnes d'équivalent de houille

Année	Consommation par habitant (tonne ou fraction de tonne)	Population	Consommation globale (en millions de tonnes)
1960 . . .	0,591	51 200 000	30 259
1965 . . .	0,658	52 430 000	34 499
1970 . . .	0,734	53 450 000	39 232
1975 . . .	0,817	54 000 000	44 120
1980 . . .	0,910	54 500 000	49 595
1985 . . .	1,013	54 630 000	55 340
1990 . . .	1,128	54 500 000	61 476
1995 . . .	1,257	54 210 000	68 142
2000 . . .	1,399	53 400 000	74 707

figure dans la deuxième colonne du tableau 4, qui donne également les informations concernant le chiffre de population et la consommation globale, toujours en milliers de tonnes d'équivalent de houille. Pour la demande d'énergie électrique, qui est cependant loin d'avoir atteint les valeurs unitaires des nations les plus développées, il faut tenir compte du fait que dans notre pays les disponibilités ont été plus grandes au cours de la première moitié du siècle présent. On a par conséquent jugé préférable d'adopter, pour le calcul de chaque période quinquennale, des taux annuels progressivement décroissants, taux qu'indique le tableau ci-après :

Période	*Taux considérés (pour cent)*	*Période*	*Taux considérés (pour cent)*
1931-1954 . .	4,835	1931-1980 . .	4,435
1931-1960 . .	4,835	1931-1985 . .	4,335
1931-1965 . .	4,735	1931-1990 . .	4,235
1931-1970 . .	4,635	1931-1995 . .	4,135
1931-1975 . .	4,535	1931-2000 . .	4,035

Tableau 5

Demande probable d'énergie électrique, exprimée en millions de kilowattheures et en milliers de tonnes d'équivalent de houille

Année	Consommation par habitant (en milliers de kWh)	Population	Consommation globale (en milliers de kWh)	Facteur de référence	Consommation globale en équivalent de houille (en milliers de tonnes)
1960 . . .	0,994	51 200 000	50 893	0,45	22 902
1965 . . .	1,219	52 430 000	63 912	0,45	28 760
1970 . . .	1,480	53 450 000	79 106	0,45	35 598
1975 . . .	1,780	54 000 000	96 120	0,40	38 448
1980 . . .	2,120	54 500 000	115 540	0,40	46 216
1985 . . .	2,502	54 630 000	136 684	0,40	54 673
1990 . . .	2,922	54 500 000	159 249	0,35	55 740
1995 . . .	3,380	54 210 000	183 230	0,35	64 140
2000 . . .	3,887	53 400 000	207 032	0,35	72 460

Les consommations électriques annuelles spécifiques s'avèrent respectivement égales à 252 kWh par habitant en 1931 et à 744 kWh par habitant en 1954. Les données obtenues en adoptant pour la période 1960-2000 les taux décroissants ci-dessus, sont mentionnées dans la deuxième colonne du tableau 5, qui donne également les chiffres de population et les consommations globales, exprimées en millions de kilowattheures et en milliers de tonnes d'équivalent de houille.

Il peut être opportun de souligner ici que, selon ces calculs, nous devrions arriver en l'an 2000 à une consommation spécifique annuelle de 3 887 kWh par habitant, autrement dit à un chiffre qui peut se comparer à celui de la consommation américaine actuelle (3 354 kWh par habitant en 1954).

En d'autres termes nous atteindrons, dans 45 ans, une consommation spécifique d'énergie électrique supérieure de 15 pour cent à la consommation présente des États-Unis d'Amérique. De ce fait la distance d'un demi-siècle environ qui nous sépare de ce pays en matière de développement économique sera légèrement atténuée — du moins dans ce secteur.

Le tableau 6 groupe les données des deux précédents et fournit par conséquent la série des valeurs exprimant la demande globale prévisible pour les années futures, en milliers de tonnes d'équivalent de houille.

Tableau 6

Demande globale prévisible d'énergie provenant des différentes sources, exprimée en milliers de tonnes d'équivalent de houille

Année	Consommation thermique (en milliers de tonnes) (*a*)	Consommation électrique (en milliers de tonnes) (*b*)	Demande totale (en milliers de tonnes) (*a* + *b*)
1960 . . .	30 260	22 900	53 160
1965 . . .	34 500	28 760	63 260
1970 . . .	39 230	35 600	74 830
1975 . . .	44 120	38 450	82 570
1980 . . .	49 600	46 220	95 820
1985 . . .	55 340	54 670	110 010
1990 . . .	61 480	55 740	117 220
1995 . . .	68 140	64 140	132 280
2000 . . .	74 710	72 460	147 170

Ces informations ne suffisent cependant pas aux fins d'une enquête sur la façon de satisfaire aux exigences prévues. Il faut considérer à cet effet que jusqu'à ce jour la production italienne d'énergie électrique est principalement alimentée par les ressources hydrauliques (82 pour cent), le restant (18 pour cent) étant partie d'origine thermique, avec consommation de combustible, et partie d'origine géothermique.

Les installations hydroélectriques sont situées pour la plupart dans l'Italie du nord, le long de l'arc alpin dont elles exploitent l'abondante houille blanche. La productibilité hydroélectrique de l'Italie centrale et méridionale, dont les ressources hydrauliques sont surtout concentrées dans les bassins hydrographiques de la portion centrale des Apennins, est considérablement plus limitée, quoique notable. Enfin les possibilités hydroélectriques des îles, et en particulier de la Sicile — compte tenu des précipitations plutôt faibles qu'on enregistre dans ces régions, où la production thermoélectrique a toujours été, par conséquent, la règle — sont très peu élevées.

La prédominance considérable de la production hydroélectrique en Italie trouve son origine et sa justification dans les ressources d'un pays qui ne disposait encore, il y a quelque temps, d'aucune source certaine de combustible sur le territoire national, tandis qu'il pouvait compter sur des disponibilités considérables d'énergie électrique potentielle, à cause des bassins hydrographiques importants des Alpes et des Apennins.

La production d'énergie électrique de source hydraulique a été, en 1954, de 29 milliards environ de kilowattheures; compte tenu des aménagements actuellement en cours de construction, dont l'achèvement est prévu pour 1957-1958, nous arrivons à une productibilité de 35 milliards environ de kilowattheures par an pendant ladite période.

Suivant les estimations courantes, on peut évaluer à 17 milliards environ de kilowattheures — dont 9 seulement exploitables économiquement, au dire des personnes compétentes — la productibilité moyenne annuelle susceptible d'être obtenue des ressources hydrauliques encore à utiliser (abstraction faite des aménagements déjà construits et de ceux qui sont encore en construction, comme indiqué plus haut).

L'exécution des aménagements nécessaires à l'exploitation de ces ressources se fera à un certain rythme, selon les possibilités financières des groupes intéressés; il n'y aurait, en effet, aucun intérêt à augmenter les investissements en ce moment, alors que ce type de travaux touche précisément à sa fin.

Si les constructions s'effectuaient au rythme le plus rapide, c'est-à-dire à raison de 2 à 3 milliards de kilowattheures par an, ces ressources supplémentaires pourraient être épuisées en 3 ou 4 ans à partir de 1957-1958.

On peut légitimement s'attendre à des apports plus importants de la part des ressources géothermiques, qui sont actuellement l'objet d'un renouveau d'intérêt et dont la production globale s'est approximativement chiffrée, en 1954, à 2×10^9 kWh. Dans ce domaine — étant donné surtout le peu d'importance relative des chiffres par rapport au total général — nous pouvons admettre qu'il est possible d'obtenir encore un supplément annuel de 4×10^9 kWh d'énergie géothermique et que les installations nécessaires à cet effet pourraient être achevées en 5 ou 6 ans.

Tableau 7

Demande probable de combustibles conventionnels pour la production d'énergie thermoélectrique

Année	Énergie hydroélectrique + énergie géoélectrique (en millions de kWh)	Énergie électrique totale (en millions de kWh)	Énergie thermoélectrique (en millions de kWh) (*a*)	Coefficient de conversion (*b*)	Demande de combustible (en milliers de tonnes d'équivalent de houille)
1931	10 200	10 500	300	0,55	165
1954	31 100	35 600	4 500	0,55	2 475
1960	41 000	50 900	9 900	0,45	4 455
1965	50 000	64 000	14 000	0,45	6 300
1970	50 000	79 100	29 100	0,45	13 095
1975	50 000	96 100	46 100	0,40	18 440
1980	50 000	115 500	65 500	0,40	26 200
1985	50 000	136 700	86 700	0,40	34 680
1990	50 000	159 200	109 200	0,35	38 220
1995	50 000	183 200	133 200	0,35	46 620
2000	50 000	207 000	157 000	0,35	54 950

Nous estimerons donc — avec une marge tolérable d'erreur — qu'à fin 1965, la productibilité totale des aménagements hydroélectriques et des installations géothermiques aura déjà atteint son plein développement et totalisera 35 + 9 + 2 + 4 = 50 milliards de kilowattheures, soit approximativement 78 pour cent de la demande prévisible pour l'année en question. Le restant (22 pour cent) devrait être produit, à la même époque, par les installations thermiques, qui n'assurent actuellement que 18 pour cent. Ces prévisions correspondent, du reste, à l'accroissement du rythme de construction des centrales thermiques. A partir de 1965, tout développement ultérieur de production devrait être assuré par des installations thermiques.

Dans la pratique, les choses se passeront peut-être autrement, mais les différences possibles ne revêtent qu'une importance secondaire étant donné le type d'enquête que nous menons actuellement.

Nous avons vu que les disponibilités hydrauliques et géothermiques, parvenues en 1965 au suprême degré d'exploitation économique, pourront couvrir 78 pour cent de la demande d'énergie électrique prévisible pour cette époque. A partir de cette année-là, il faudra veiller à couvrir la totalité de la demande supplémentaire d'énergie par la construction de centrales thermiques alimentées par les combustibles traditionnels ou par des combustibles nucléaires.

Nous avons déjà indiqué, au tableau 4, la demande prévisible de combustibles pour usages purement thermiques, exprimée en milliers de tonnes d'équivalent de houille. La demande probable de combustibles pour production d'énergie thermoélectrique figure dans la dernière colonne du tableau 7.

Enfin les chiffres de la demande totale — somme des valeurs des deux séries susdites — ressort de la quatrième colonne du tableau 8, d'où l'on peut conclure qu'il faudra au total, en 1975, 62 millions environ de tonnes d'équivalent de houille, et en l'an 2000, 130 millions environ de tonnes d'équivalent de houille, en combustibles de différentes espèces.

Tableau 8

Demande et disponibilité totales de combustibles exprimées en milliers de tonnes d'équivalent de houille

Année	Demande de combustibles traditionnels			Disponibilité
	Pour usages thermiques (*a*)	Pour énergie thermoélectrique (*b*)	Total (*a* + *b*)	
1960 .	30 300	4 500	34 800	34 900
1965 .	34 500	6 300	40 800	39 375
1970 .	39 200	13 100	52 300	47 500
1975 .	44 000	18 400	62 400	56 250
1980 .	49 600	26 200	75 800	63 750
1985 .	55 300	34 700	90 000	70 250
1990 .	61 500	38 200	99 700	76 750
1995 .	68 100	46 600	114 700	76 750
2000 .	74 700	55 000	129 700	76 750

La dernière colonne de ce même tableau 8 donne, à titre de comparaison et en vue des conclusions susceptibles d'en être tirées, les disponibilités totales présumées de combustibles traditionnels, de 5 en 5 ans, jusqu'en l'an 2 000. Avant de comparer, il nous semble avantageux de donner un aperçu de la méthode adoptée pour l'évaluation de ces disponibilités.

La production nationale de combustibles traditionnels a été jusqu'à ces dernières années absolement dérisoire. Cette situation est encore la même actuellement en ce qui concerne les combustibles

solides, dont la production annuelle peut être considérée au maximum — sans qu'on s'écarte sensiblement des évaluations économiques — comme d'environ 1 million de tonnes d'équivalent de houille. Les recherches actuellement entreprises en vue d'une exploitation plus rationnelle du bassin de lignite du Valdarno n'améliorent que très faiblement ces perspectives et ne laissent d'ailleurs prévoir qu'une durée d'exploitation de l'ordre d'un quart de siècle.

C'est donc sur les importations qu'il faut compter pour la plus grande partie des besoins à satisfaire.

Dans le domaine des hydrocarbures, par contre, les vagues espérances nées des recherches effectuées sur le territoire national immédiatement avant le deuxième conflit mondial ont été confirmées dans l'après-guerre, d'abord par la découverte d'importants gisements de méthane, puis par celle d'intéressants gisements pétrolifères dans la province de Raguse (Sicile) et dans les Abruzzes (Alanno). La production de méthane, qui a déjà atteint le chiffre annuel de 3 milliards de mètres cubes est en progrès incessant.

On a d'autre part identifié, au voisinage de Raguse (Sicile) et à 2 000 m de profondeur, un vaste gisement de brut à base asphaltique, où les premiers forages exécutés avec succès donnent déjà lieu à une production de quelques centaines de tonnes de pétrole par jour.

Les autres prospections effectuées le 11 janvier 1955 au voisinage d'Alanno (province de Pescara) ont permis d'identifier au moins une formation à 700 m environ de profondeur, et l'on a tout lieu de croire que d'autres découvertes suivront au même endroit. Ces résultats, joints à l'ensemble des recherches géophysiques effectuées dans différentes régions, laissent espérer que notre pays se trouve au début d'une nouvelle période en ce qui concerne la disponibilité d'hydrocarbures, et rendent d'autant plus délicate toute prévision bien fondée en ce qui concerne l'avenir de nos ressources énergétiques.

Vu la nécessité d'adopter des chiffres aux fins de la présente étude, nous avons évalué la disponibilité des différents combustibles traditionnels en nous basant, dans chaque cas, sur les considérations suivantes :

Charbon

Le peu d'activité du marché mondial, la stabilité des prix à un niveau élevé — en dépit de la concurrence de l'huile combustible — et les difficultés croissantes entravant, dans les pays producteurs, le recrutement de la main-d'œuvre nous ont fait renoncer à demander au marché — qui devra néanmoins inévitablement s'étendre — une participation de l'Italie aux achats plus importante relativement que celle qui existe en ce moment. Nous avons donc imaginé que nos importations augmenteront de manière à amener progressivement les disponibilités de la valeur actuelle de 13 millions de tonnes par an à celle de 16 millions en 1980, et que ce dernier chiffre restera constant jusqu'en l'an 2000.

En raisonnant de la sorte, nous tenons également compte de l'opportunité de garder une certaine réserve en cas d'échec de telle ou telle autre prévision sur les possibilités d'approvisionnement dans d'autres domaines.

Méthane

Partant de la disponibilité actuelle de 3 milliards de mètres cubes par an et sur la base des prospections géophysiques effectuées jusqu'à ce jour, les techniciens de l'industrie de production du méthane estiment pouvoir progressivement atteindre le chiffre de 9 milliards de mètres cubes en 1975, avec prévision, sur ce total, d'une réserve de 2 milliards à destiner aux usages chimiques et civils. Les disponibilités probables, pour les buts qui nous intéressent, évaluées de 5 en 5 ans, sont énumérées à la troisième colonne du tableau 9.

Tableau 9

Disponibilités probables de combustibles traditionnels

Années	Charbon (en milliers de tonnes)	Méthane (en millions de m³)	Pétrole (en milliers de tonnes)
1960 . . .	13 000	4 000	13 000
1965 . . .	13 000	5 500	15 000
1970 . . .	14 000	6 000	20 000
1975 . . .	15 000	7 000	25 000
1980 . . .	16 000	7 000	30 000
1985 . . .	16 000	7 000	35 000
1990 . . .	16 000	7 000	40 000
1995 . . .	16 000	7 000	40 000
2000 . . .	16 000	7 000	40 000

Pétrole

Dans la situation actuelle et vu nos connaissances limitées en matière de ressources nationales, l'évaluation des disponibilités s'avère sans aucun doute des plus hasardeuses. Les personnes compétentes de l'organisme national qui s'occupe de la question estiment, sur la base des éléments dont elles disposent — éléments dont elles ne donnent d'ailleurs pas le détail — qu'on peut compter sur une réserve totale de l'ordre de 2 milliards de tonnes et une production croissante, de manière à envisager d'atteindre une disponibilité annuelle de 40 millions de tonnes, compte tenu des quantités importables et déduction faite de toute réexportation, qui représentent environ 10 millions de tonnes par an.

En admettant, par prudence, un rythme d'accroissement sensiblement inférieur à leurs pronostics,

nous adoptons pour les années jusqu'à l'an 2000 les valeurs indiquées au tableau 9, dernière colonne.

Ces disponibilités en combustibles traditionnels, traduites en tonnes d'équivalent de houille, sont groupées au tableau 10, dont la dernière colonne indique les disponibilités totales présumées (également mentionnées dans la dernière colonne du tableau 8, où elles sont placées en regard des chiffres correspondant à la demande).

Tableau 10

Disponibilités probables en combustibles traditionnels

(En milliers de tonnes d'équivalent de houille)

Années	Méthane	Pétrole	Charbon	Total
1960 . .	5 000	16 900	13 000	34 900
1965 . .	6 875	19 500	13 000	39 375
1970 . .	7 500	26 000	14 000	47 500
1975 . .	8 750	32 500	15 000	56 250
1980 . .	8 750	39 000	16 000	63 750
1985 . .	8 750	45 500	16 000	70 250
1990 . .	8 750	52 000	16 000	76 750
1995 . .	8 750	52 000	16 000	76 750
2000 . .	8 750	52 000	16 000	76 750

COMPARAISON ENTRE LES DISPONIBILITÉS ACTUELLES ET LA DEMANDE PRÉVISIBLE ROLE DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

La comparaison entre les données contenues dans les deux dernières colonnes du tableau 8 nous indique que la situation ne donnera probablement lieu à aucune préoccupation jusqu'en 1965, année où il est à prévoir qu'une demande de 40,8 millions de tonnes se trouvera en regard d'une disponibilité de 39,4 millions de tonnes; et qu'il faudra alors commencer à faire face à la situation soit par des importations plus considérables de combustibles traditionnels — qui s'avéreront de plus en plus problématiques — soit par l'utilisation toujours croissante des combustibles nucléaires.

Si le problème pouvait être résolu de façon avantageuse par le nouveau système, c'est-à-dire si l'insuffisance d'énergie électrique pouvait être comblée par la réalisation d'installations nucléaires, la situation serait par ailleurs assez rassurante. Les chiffres du tableau 8 prouvent en effet que, jusqu'en l'an 2000, les disponibilités présumées de combustibles traditionnels demeureront toujours supérieures aux demandes partielles pour usages purement thermiques — même si elles se révèlent insuffisantes à satisfaire la demande totale. En l'an 2000, la disponibilité totale présumée de 76 750 000 tonnes d'équivalent de houille dépassera tant soit peu la demande de 74 700 000 tonnes pour les usages en question.

Tout porte donc à affirmer que — sauf imprévu — l'Italie devra mettre au plus tard en service ses centrales nucléaires pendant l'année 1965, et qu'à partir de cette même année elle devra poursuivre la construction d'autres centrales de ce genre, à un rythme correspondant à 3 milliards environ de kilowattheures par an au début, pour l'accélérer ensuite régulièrement jusqu'à atteindre environ 5 milliards par an pendant la dernière période décennale.

On entrevoit déjà de quelle manière on pourra satisfaire aux charges variables qu'entraîne une distribution continue : les centrales thermiques finiront par être principalement affectées à la fourniture de l'énergie de base du diagramme de charge, tandis que les centrales hydrauliques — toujours mieux équipées de réservoirs de super-régularisation et susceptibles de fournir des puissances excédant la demande — seront destinées à couvrir les charges de pointe.

L'accroissement de la demande annuelle entre les années 1965 et 2000 (207 — 64 = 143 milliards de kilowattheures) devra être balancé par la construction de centrales nucléaires, qui assureront un service approximatif de 7 000 heures par an. Ces conditions correspondent à une puissance installée de 20 millions de kilowatts.

Il faudra bien entendu veiller, à partir d'aujourd'hui et jusqu'en 1965, à l'achèvement de tous les aménagements hydroélectriques du programme prévu par la Commission Santoro pour un total de 9 milliards de kilowattheures, déjà en cours de réalisation, et assurer d'autre part la construction d'installations géothermiques pour un total de 4 millions de kilowattheures.

Nous avons d'autre part indiqué plus haut qu'en 1965 les installations thermoélectriques ordinaires devront être en mesure de fournir une quantité d'énergie égale à 22 pour cent de la demande totale de 64 milliards, autrement dit à 14 milliards de kilowattheures, avec une augmentation d'environ 9,5 milliards par rapport au chiffre approximatif de 4,5 milliards de l'année 1954. A cet accroissement correspond une puissance installée de $1{,}6 \times 10^6$ kW, sur la base de 6 000 heures de fonctionnement par an.

La puissance installée des nouvelles installations géothermiques dont nous avons parlé correspond à 530 000 kW, avec possibilité de 7 500 heures de service annuel.

INVESTISSEMENTS D'ENSEMBLE ET PRIX DE REVIENT

La production d'énergie sera donc obtenue au moyen d'aménagements hydroélectriques et d'installations thermoélectriques, ces dernières susceptibles de fonctionner à la vapeur naturelle, aux combustibles traditionnels et aux combustibles nucléaires.

A leur tour, les aménagements hydroélectriques pourront être au fil de l'eau, à réservoir ou d'intégration. A ces trois types correspondent des coûts de construction croissants, dans l'ordre indiqué, c'est-à-dire que les aménagements au fil de l'eau assurent le coût le moins élevé par kilowattheure annuellement produit et les aménagements d'intégration le coût le plus élevé. Nous parlons, bien entendu, des coûts moyens de chaque catégorie, les coûts individuels pouvant varier dans chaque cas, à égalité de type, suivant la situation locale.

La question a été amplement examinée par la Commission Santoro, avec la pleine collaboration des groupes intéressés, et l'on a conclu que l'on adopterait la valeur moyenne de 40 lires par kilowattheure productible dans les aménagements au fil de l'eau, et 75 lires par kilowattheure obtenu dans les aménagements à réservoir. En considération, d'autre part, du fait que la tendance à la nouvelle répartition des tâches entre aménagements hydrauliques et installations thermiques plaidera en faveur de la prédominance des aménagements à réservoir dans les prochains programmes de construction, la Commission a adopté un prix moyen de 65 lires par kilowattheure d'énergie productible, à appliquer à l'ensemble du programme envisagé par elle. Nous nous en tiendrons nous-mêmes à ce prix pour le restant des constructions hydroélectriques réalisables en Italie.

Les installations thermoélectriques modernes, constituées par de grandes centrales d'une puissance égale ou supérieure à 100 000 kW et équipées de groupes turbo-alternateurs d'au moins 50 000 kW chacun, ont des coûts d'installation variables d'un minimum de 90 000 lires par kilowatt (en cas d'alimentation au méthane) à un maximum de 110 000 lires environ (en cas de combustibles solides), Nous adopterons, pour les évaluations qui vont suivre, la moyenne de 100 000 lires par kilowatt installé.

Le coût du kilowatt provenant des installations géothermiques est plus difficile à fixer, compte tenu d'un côté de la construction moins coûteuse de la chaudière et de l'autre des capitaux assez considérables exigés par le forage des puits et par leur raccordement à la centrale. Les nouvelles orientations de la technique et la faveur croissante des télécontrôles et des télécommandes semblent devoir remettre en question l'opportunité d'évaluer, sous l'angle économique, les mérites comparatifs des petits groupes respectivement installés au-dessus des soufflards par rapport à ceux des grands groupes situés au centre de gravité de plusieurs puits de production. Par prudence, nous nous en tiendrons au chiffre de 150 000 lires par kilowatt installé dans l'évaluation du financement nécessaire.

Il nous reste à dire quelques mots du coût des centrales thermonucléaires, au sujet desquelles nous ne disposons que d'un petit nombre d'éléments probants. Si l'on ajoutait foi aux données les plus vraisemblables, il faudrait accepter, à titre provisoire, un coût par unité de puissance installée au moins double de celui qui a été adopté pour les centrales thermiques alimentées par les combustibles traditionnels. Aucune différence n'existant entre ces deux types d'installations en ce qui concerne les turbo-alternateurs et accessoires — auxquels correspondent au maximum les deux tiers du coût des centrales ordinaires —, l'hypothèse que nous venons de formuler consiste à admettre que les piles, échangeurs et accessoires exigés par les installations nucléaires entraîneront une dépense au moins quatre fois plus grande que celle que nécessitent aujourd'hui les chaudières des installations traditionnelles.

Sur la base de ces données de principe, nous pouvons procéder, du moins en ce qui concerne l'ordre de grandeur, au calcul des investissements qu'il faudra effectuer dès aujourd'hui en vue de couvrir la demande d'énergie électrique telle qu'elle se présentera en l'an 2000, et que nous exprimerons en lires ayant le même pouvoir d'achat qu'aujourd'hui.

Nous obtenons le tableau suivant :

		Milliards de lires
Aménagements hydroélectriques :	9×10^9 kWh $\times 65$ . .	580
Installations géothermiques :	530 000 kWh $\times$ 150 000 . . .	80
Installations thermoélectriques traditionnelles :	$1{,}6 \times 10^6$ kWh $\times 100\,000$ . . .	160
Installations thermoélectriques nucléaires :	20×10^6 kWh $\times 200\,000$ . . .	4 000
TOTAL	. . . . .	4 820

Nous nous trouvons donc en présence d'une demande considérable, à laquelle nous ne pourrons satisfaire qu'en imposant à l'épargne un effort considérable et prolongé, qui ne pourra être obtenu — en régime de liberté — qu'au prix d'une ténacité persévérante et d'une série de mesures prudentes.

Nous nous efforcerons de donner, pour finir, quelques chiffres sur les prix de revient de l'énergie susceptible d'être fournie par les nouvelles installations qu'il sera progressivement nécessaire de réaliser à ce sujet; nous devons considérer en premier lieu qu'en Italie le loyer de l'argent est très élevé et que, si les conditions actuelles persistent, le taux d'intérêt qui grèvera les installations variera de 8 à 9 pour cent; et nous effectuerons les calculs dans l'une et l'autre de ces deux hypothèses.

En ce qui concerne les amortissements, nous nous éloignerons sensiblement de la ligne de conduite adoptée par la Commission Santoro, tout en déclarant que notre choix ne dérive point de la prétention de trancher définitivement ici une question très discutée, dont l'importance aux fins de notre étude est inférieure à celle d'une enquête tarifaire.

Évitant d'employer les taux annuels admis par le fisc, nous utiliserons ceux qui dérivent du calcul de l'amortissement financier sur la base de l'intérêt composé. Comme temps d'amortissement, nous choisirons : 15 ans pour les centrales thermiques, géothermiques et nucléaires; 30 ans pour les aménagements hydroélectriques.

On obtient les valeurs suivantes :

Taux	*15 ans*	*30 ans*
8 pour cent	11,68	8,88
9 pour cent	12,70	9,67

Pour les centrales hydrauliques, il faut ajouter en moyenne à ce pourcentage 2,5 pour cent sur le coût d'installation, pour tenir compte des frais d'exploitation et redevances diverses. On obtient de la sorte les prix de revient indiqués par le tableau 11.

Tableau 11

Prix de revient de l'énergie hydroélectrique par kilowattheure

	Centrales			
	Au fil de l'eau (40 lires)		A réservoir (75 lires)	
Taux d'intérêt (pour cent)	8	9	8	9
Charges sur le capital	3,55	3,86	6,66	7,23
Frais et redevances (2,5 pour cent). .	1,00	1,00	1,87	1,87
TOTAL . . .	4,55	4,86	8,53	9,10

Pour les installations thermoélectriques traditionnelles, considérons une période d'amortissement de 15 années et un pourcentage annuel de 3 pour cent sur le coût d'installation pour tenir compte des charges d'exploitation; le tout dans la seule hypothèse d'un service de 6 000 heures par an. Nous obtenons ainsi les valeurs exprimées dans le tableau 12.

Tableau 12

Prix de revient par kilowattheure d'énergie thermoélectrique

	Taux d'intérêt	
	8 pour cent	*9 pour cent*
Charges sur le capital .	1,48	1,60
Charges d'exploitation .	0,50	0,50
Frais de combustible . .	3,85	3,85
TOTAL	5,83	5,95

Dans le tableau 12, les frais de combustible ont été calculés dans l'hypothèse où la consommation serait réduite à l'équivalent de 0,400 kg de houille par kilowattheure et où l'on brûlerait du méthane (coefficient 1,25) payé à raison de 12,00 lires le mètre cube.

La production géothermique entraînera également une dépense de 3 pour cent pour les différentes charges d'exploitation; ces frais sont proportionnels à un capital de 150 000 lires par kilowatt installé, mais pour un service de 7 500 heures par an.

Nous admettrons, comme pour les centrales thermoélectriques traditionnelles, une période d'amortissement de 15 ans.

Tableau 13

Prix de revient par kilowattheure d'énergie géothermique

	Taux d'intérêt	
	8 pour cent	9 pour cent
Charges sur le capital .	2,33	2,54
Charges d'exploitation .	0,60	0,60
TOTAL	2,93	3,14

Les prix de revient ainsi obtenus constituent, dans les conditions italiennes, une valeur limite inférieure; il faut cependant considérer aussi que les installations géothermiques fournissent une disponibilité d'énergie continue qu'il est difficile de mettre complètement en valeur pendant la totalité des heures de service, à moins qu'on ne l'associe à une grande quantité d'énergie plus coûteuse.

En comparaison des coûts calculés jusqu'à présent, il est bon d'examiner la situation prévisible en ce qui concerne la production d'énergie nucléaire. Parmi les différents éléments dont on doit tenir compte dans le coût de cette dernière production, la consommation de combustible nucléaire et les traitements périodiques auxquels ce combustible doit être soumis s'avèrent comme les plus incertains.

On peut toutefois affirmer, dans l'ensemble, que la question économique des installations nucléaires ne diffèrera pas sensiblement de celle des aménagements hydroélectriques, qui sont caractérisés par une forte proportion de charges financières sur les capitaux engagés, contre un pourcentage modique de charges d'exploitation.

Le coût d'installation de 200 000 lires par kilowatt installé, dont nous avons parlé précédemment, n'est pas très éloigné de celui d'une centrale hydroélectrique au fil de l'eau utilisable à raison de 5 000 heures de service par an, soit 5 000 × 40,00 lires = 200 000 lires.

L'installation nucléaire serait susceptible de fonctionner pendant un plus grand nombre d'heures (près de 8 000 par an); mais l'énergie fournie serait

en moyenne de moindre valeur, et de plus, le coût devrait être grevé d'un pourcentage modique, mais encore à définir, pour frais entraînés par le combustible.

De même que pour l'énergie hydroélectrique, le coût d'exploitation des centrales nucléaires dépendra largement du loyer de l'argent, qui est malheureusement élevé chez nous et qui l'est généralement encore davantage dans les pays sous-développés, dont l'industrialisation est surtout entravée par l'insuffisance d'énergie, et surtout d'énergie à bon marché.

Il ne faut donc pas s'attendre, au cours des prochaines années, à ce que les installations nucléaires constituent immédiatement une source de production à bas prix, à moins qu'on ne dispose de capitaux à très faible intérêt; mais il y a lieu de prévoir tout de même un développement rapide de la demande d'énergie nucléaire par suite de la nécessité de suppléer aux disponibilités toujours plus faibles de combustibles traditionnels à bon marché. Nous pouvons donc affirmer, à titre de conclusion, que le développement rapide de cette branche de la technique, née sous d'autres auspices que ceux de la paix, s'est avéré et s'avérera toujours davantage comme providentiel; il permettra d'éviter que le rythme pacifique du progrès économique ne soit retardé ou interrompu par l'insuffisance des disponibilités énergétiques en présence de la demande sans cesse croissante.

Nous tenons à exprimer nos plus vifs et sincères remerciements au Directeur et aux Bureaux de l'Anidel et de l'ENI, qui ont accordé leur active collaboration au Comité pour le rassemblement et l'élaboration des données.

Les besoins futurs de la Corée en énergie électrique et thermique

par Chullchai Park*

En Corée, les combustibles utilisés pour la production en énergie électrique et thermique sont le charbon de bois, le bois de chauffage, le charbon, le pétrole, etc.; les centrales thermiques comptent pour 60 pour cent dans la production d'électricité.

La production d'énergie électrique en Corée est actuellement de 106 000 kW; elle ne suffit pas, il s'en faut de beaucoup, à satisfaire la demande actuelle. Le gouvernement a établi des plans d'après lesquels la production atteindra 320 000 kW en 1957. A supposer que la demande augmente de 7 pour cent chaque année**, les besoins en électricité de la Corée s'élèveront à 1 100 000 kW en 1975, et à 5 869 000 en l'an 2000.

En 1951, la Corée a consommé un million de tonnes métriques de charbon. Si la demande de charbon s'accroît à raison de 8 pour cent***, le pays aura besoin de 5,5 millions de tonnes métriques de charbon en 1975, et de 20 millions de tonnes métriques en l'an 2000.

ÉTAT ACTUEL DE LA PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Les caractéristiques géographiques de la Corée et le gros débit de ses rivières offrent des possibilités de produire de l'énergie électrique en abondance. On trouvera ci-après les chiffres de la production et de la puissance installée des centrales hydrauliques existant sur tout le territoire de la Corée du Sud et du Nord.

Original : anglais.

* Directeur du Bureau de l'enseignement technique, Ministère de l'éducation, République de Corée.

** Hypothèse fondée sur le taux d'accroissement calculé pour d'autres pays.

*** Cette estimation tient compte de l'accroissement naturel de la population, du développement de la capacité industrielle et de l'insuffisance actuelle de la production de charbon.

Tableau 1

Production d'énergie hydroélectrique de la Corée

Classement du projet	Corée du Sud		Corée du Nord	
	Nombre de centrales	Puissance (en kW)	Nombre de centrales	Puissance (en kW)
Projets dont la réalisation a été autorisée :				
En exploitation	6	94 360	26	169 930
Construction en cours	—	—	7	1 128 900
Construction prévue	3	76 626	9	827 600
Projets dont la réalisation n'a pas été autorisée :				
Ressources reconnues	13	313 100	29	1 065 200
Ressources non reconnues	21	144 900	47	839 600
TOTAL	43	628 986	118	4 031 230
	Nombre de centrales		Puissance (en kW)	
TOTAL GÉNÉRAL (ensemble du territoire coréen)	161		4 660 216	

Source : Ministère du commerce et de l'industrie.

NOTE. — Voir : *Rapport annuel du Département du commerce et de l'industrie de Corée, 1947.*

Les centrales hydroélectriques exploitées en Corée avant le 15 août 1945 sont indiquées au tableau 2.

Tableau 2

Centrales hydrauliques en exploitation sur l'ensemble du territoire coréen avant le 15 août 1945

Source (rivière)	Centrale	Système de production	Puissance totale (en kW)	Puissance disponible (en kW)	Date de construction
Yalu	*Rivière Changjin*				
	Centrale n° 1	Barrage-canal de dérivation	144 000	116 000	1933-1935
	Centrale n° 2	Canal de dérivation	106 000	77 600	1933-1936
	Centrale n° 3	Canal de dérivation	42 000	33 000	1933-1937
	Centrale n° 4	Canal de dérivation	34 000	28 500	1933-1937
	Rivière Pujun				
	Centrale n° 1	Barrage-canal de dérivation	129 600		1926-1929
	Centrale n° 2	Canal de dérivation	41 400		1926-1930
	Centrale n° 3	Canal de dérivation	18 000		1926-1930
	Centrale n° 4	Canal de dérivation	12 375		1926-1933
	Rivière Hochun				
	Centrale n° 1	Barrage-canal de dérivation	145 000	110 000	1936-1940
	Centrale n° 2	Canal de dérivation	69 800	51 400	1936-1940
	Centrale n° 3	Canal de dérivation	58 000	39 000	1936-1941
	Centrale n° 4	Canal de dérivation	66 000	42 000	1936-1941
Tomen	*Rivière Puryong*				
	Centrale n° 1	Barrage-canal de dérivation	13 400	6 700	1938
	Centrale n° 2	Canal de dérivation	9 400	4 700	1940
	Centrale n° 3	Barrage-canal de dérivation	5 200	2 600	1940
Han	Hwachun	Barrage-canal de dérivation	81 000	16 500	1941
	Chungpyung	Barrage-canal de dérivation	39 000	13 000	1943
Sumjin	Unam	Barrage-canal de dérivation	5 120		1943
	Sumjin	Barrage-canal de dérivation	27 700		1940-1945
Yalu	Supung	Barrage-canal de dérivation	700 000		1937-1943
Kwanggyo . .	*Mont Kumkang*				
	Centrale n° 1		720		
	Centrale n° 2		7 000		
	Centrale n° 3		3 250		
	Centrale n° 4		2 600		
TOTAL . .			1 760 565		

Source : Ministère du commerce et de l'industrie.

En Corée, l'électricité est produite selon deux systèmes, à savoir les centrales thermiques et les centrales hydrauliques. Jusqu'au 15 août 1945, la production a permis de satisfaire complètement la demande de l'ensemble du pays et même de fournir du courant à la Mandchourie. Le tableau 3 donne les chiffres de la production et des fournitures d'énergie pour plusieurs années antérieures au 15 août 1945.

Tableau 3

Production et distribution moyennes d'électricité jusqu'au 15 août 1945

Année	Énergie électrique produite (moyenne) (en kW)			Énergie électrique distribuée (moyenne) (en kW)			
	Corée du Sud	Corée du Nord	Total	Corée du Sud	Corée du Nord	Mandchourie	Total
1941. . .	44 500	524 670	569 170	60 000	446 000	21 000	527 000
1942. . .	44 400	664 600	709 000	67 000	500 000	107 000	674 000
1943. . .	38 000	764 000	802 000	75 000	596 000	174 000	845 000
1944. . .	36 000	904 000	940 000	80 000	658 000	240 000	978 000
1945. . .	40 000	800 000	840 000	75 000	333 000	178 000	586 000

Source : Ministère du commerce et de l'industrie.

Au tableau 4, on trouvera les chiffres moyens de la production et de la distribution d'énergie électrique de 1946 au 14 mai 1948, date à laquelle la Corée du Nord a arrêté ses fournitures d'électricité.

Tableau 4

Production et distribution moyennes d'électricité en Corée du Sud (1946-14 mai 1948)

Année	Énergie produite en Corée du Sud (en kW)	Énergie fournie par la Corée du Nord (en kW)	Total (en kW)	Énergie distribuée en Corée du Sud (en kW)
1946 .	25 000	53 000	78 000	71 000
1947 .	32 000	62 000	94 000	87 000
1948 .	54 000	50 000	104 000	95 000

Source : Ministère du commerce et de l'industrie.

On trouvera au tableau 5 les chiffres de la production et de la distribution d'énergie électrique après le 14 mai 1948.

Tableau 5

Production et consommation moyennes d'énergie

Année	Énergie produite (en kW)	Énergie distribuée (en kW)
1949 . . .	74 000	67 000
1950 . . .	50 000	45 500
1951 . . .	51 838	47 190
1952 . . .	71 332	63 930
1953 . . .	84 025	75 658
1954 . . .	102 636	93 542
1955 . . .	106 007	94 246

Source : Ministère du commerce et de l'industrie.

Au tableau 6 figurent les quantités d'énergie électrique produites par diverses centrales de Corée du Sud depuis 1946.

D'après les plans du gouvernement, la production annuelle atteindra en moyenne 320 000 kW en 1957 et il devrait être possible d'équilibrer la demande et l'offre en agrandissant les centrales dont la construction est en cours, notamment une centrale hydraulique dans la région de Chungju et deux centrales thermiques de la région de Masam et Samchock. Ces nouvelles centrales développeront plus de 200 000 kW. A supposer que la demande augmente de 7 pour cent par an à partir de 1957, le pays aura besoin d'environ 1 100 000 kW en 1975, et de 5 869 000 kW en l'an 2000, comme il résulte des calculs ci-après :

$$320\,000 \text{ kW} \times (1 + 0{,}07)^{18} = 1\,100\,000 \text{ kW}$$
(en 1975)

$$1\,100\,000 \text{ kW} \times (1 + 0{,}07)^{25} = 5\,869\,000 \text{ kW}$$
(en l'an 2000)

Tableau 6. **Production d'énergie électrique des diverses centrales (en milliers de kWh)**

Année	Total général	Centrales hydrauliques						Centrales thermiques					Groupes mobiles
		Total pour les centrales hydrauliques	Chongpyong	Sumjin	Posong	Unam	Hwachon	Total pour les centrales thermiques	Yongwol	Tanginri	Pusan	Autres	
1946 . . .	225 024	216 957	169 682	22 343	18 850	5 581	—	8 067	6 222	1 845	—	—	—
1947 . . .	276 678	208 478	155 639	34 983	13 313	4 543	—	68 200	65 469	2 731	—	—	—
1948 . . .	489 951	242 113	162 046	53 507	14 800	11 760	—	164 502	103 291	52 313	8 898	—	83 336
1949 . . .	655 121	202 253	127 322	47 325	16 734	10 872	—	320 099	213 732	81 323	15 248	9 796	132 769
1950 . . .	420 666	97 026	54 789	11 881	11 481	18 875	—	259 350	173 463	47 816	28 424	9 647	64 290
1951 . . .	336 630	58 688	21 091	21 530	12 502	3 465	—	87 910	51 888	20 247	13 518	2 257	190 032
1952 . . .	639 677	233 740	161 701	35 179	14 080	8 818	14 362	174 418	132 190	36 580	4 061	1 587	231 519
1953 . . .	736 065	394 536	159 062	37 492	14 020	6 922	177 040	129 798	102 785	26 473	540	—	211 731
1954 . . .	899 096	513 240	200 687	46 220	15 872	—	250 461	120 353	91 496	28 857	—	—	265 502
1955 . . 1	78 581	21 520	5 466	192	658	—	15 204	24 582	21 055	3 527	—	—	32 480
2	71 525	26 353	8 021	106	448	—	17 778	18 805	15 860	2 945	—	—	26 367
3	81 285	42 024	13 607	7 315	1 042	272	19 788	12 293	7 808	4 398	—	—	27 056

Source : Compagnie d'électricité de Corée.

SOURCES DE CHALEUR

Actuellement on utilise le charbon, le bois de feu, le charbon de bois, les fagots, les herbes sèches, le pétrole, etc., pour produire la chaleur nécessaire à l'industrie ou au chauffage. Le charbon occupe la première place parmi ces combustibles. On trouvera au tableau 7 les chiffres de la production et des importations de charbon de la Corée.

Tableau 7

Production et importations de charbon en milliers de tonnes métriques

Année	Total général	Production		Lignite	Importations de charbon gras
		Total de la production	Anthracite		
1947 . .	1 158	467	430	37	630
1948 . .	1 750	783	315	68	968
1949 . .	1 705	1 044	981	63	661
1950 . .	811	592	564	28	219
1951 . .	993	240	237	3	753
1952 . .	1 333	577	576		756
1953 . .	1 546	867	867		679
1954 . .	1 792	891	891		901

Source : Ministère du commerce et de l'industrie.

Il ressort du tableau 7 que la consommation de charbon s'est élevée à environ 1 000 000 de tonnes en 1951. Toutefois, la demande réelle est évaluée au triple de la consommation effective. Dans l'hypothèse selon laquelle la demande augmentera de 7 à 8 pour cent par an en raison de l'accroissement de la population et du développement du pays, la Corée aura besoin de quelque 5 500 000 tonnes de charbon en 1975. Étant donné que l'accroissement démographique sera le principal des facteurs qui influeront la demande après 1975, les besoins s'élèveront en l'an 2000 à 20 millions de tonnes (soit le triple de la demande de 1975), à supposer que la population augmente chaque année de 3 pour cent.

Le tableau 8 indique la consommation des combustibles autres que le charbon en 1954.

Tableau 8

Consommation de bois de feu, de charbon de bois, de bois mort, d'herbe sèche et d'autres déchets de la production agricole, en 1954

	En milliers de tonnes métriques
Bois de feu	179
Charbon de bois	15
Fagots	290
Herbe sèche	2 397
Déchets de la production agricole	3 440
TOTAL	6 321

Le tableau 9 chiffre le pouvoir calorifique de ces divers combustibles.

Tableau 9

Pouvoir calorifique de certains combustibles

Combustible	Pouvoir calorifique (en kcal/kg) compris entre	Pouvoir calorifique moyen (en kcal/kg)
Bois de feu	4 000 et 4 500	4 250
Charbon de bois . . .	6 500 et 7 500	7 000
Fagots	4 000 et 5 000	4 500
Herbe sèche	3 500 et 5 000	4 250
Déchets de la production agricole . . .	3 500 et 4 500	4 000

Source : Ministère de l'agriculture et des forêts.

Même si la production et les importations de charbon augmentent suffisamment pour satisfaire la demande indiquée plus haut, la consommation des autres combustibles n'accusera peut-être pas une baisse très marquée, car ces matières continueront à satisfaire une proportion importante des besoins de la population.

La consommation d'huiles minérales en Corée, — notamment l'essence, le pétrole lampant, l'huile diesel et le mazout — est indiquée au tableau 10.

Tableau 10

Consommation de produits pétroliers

(En milliers de gallons des États-Unis d'Amérique)

Année	Essence	Pétrole lampant	Huile diesel	Mazout	Total
1946 .	10 443	5 525	4 118	9 416	29 502
1947 .	16 110	6 483	7 582	13 518	43 693
1948 .	21 655	8 350	13 596	20 360	63 961
1949 .	24 559	9 616	15 494	23 727	73 396
1950 .	8 839	4 264	9 478	9 024	31 605
1951 .	7 155	6 121	4 878	12 762	30 916
1952 .	13 903	8 892	4 809	12 117	39 721
1953 .	24 362	12 253	12 974	26 240	75 829
1954 .	29 952	12 164	12 699	21 200	76 015

Compte tenu de l'accroissement réel de la demande de pétrole qui ressort du tableau 10, et de l'accroissement naturel de la population, le taux d'augmentation de la consommation de produits pétroliers est de 5 pour cent. Par conséquent, en 1975, la demande aura triplé par rapport à 1955, et elle sera près de 9 fois plus forte en l'an 2000.

Note sur l'offre et la demande d'énergie électrique en Nouvelle-Zélande

Renseignements fournis par le Département d'État pour l'énergie hydroélectrique en Nouvelle-Zélande

Il n'est pas de régions de grande densité de population en Nouvelle-Zélande qui ne soient alimentées par un service public d'électricité. Si de nouvelles industries consommant de grandes quantités d'énergie ne sont pas créées, l'augmentation de la consommation d'énergie dans l'avenir proviendra de l'accroissement de la population, de la demande des usagers et du prix relatif de l'électricité ou de toute autre forme de chaleur et d'énergie.

En 1954-55 (exercice se terminant le 31 mai 1955), la population atteignait au total 2 130 000 habitants et on comptait un abonné à l'électricité pour 3,2 habitants. L'ensemble de l'énergie produite atteignait 4 382 millions de kilowattheures, la production moyenne par usager atteignant 6 580 kWh. La vente au détail de l'énergie électrique atteignait en moyenne 5 300 kWh pour chaque usager. La consommation domestique représentait 60 pour cent de la consommation totale.

En 1933-34, le prix de vente au détail de l'électricité pour tout usage atteignait en moyenne 1,21 penny par kilowattheure ; 1,11 penny en 1953-54.

Rien ne laisse prévoir pour de nombreuses années à venir une stabilisation de la consommation électrique par habitant. La moitié environ des usagers employant l'électricité à des fins domestiques, possèdent des cuisinières électriques et des chauffe-eau, et, à moins que les prix relatifs de l'électricité ou d'autres formes de chauffage ne subissent d'importants changements, cette proportion ne cessera d'augmenter régulièrement à l'avenir. Une augmentation récente de 25 pour cent du prix de l'électricité, élevant le prix de détail de 0,89 à 1,11 penny le kilowattheure, entre 1953 et 1954, ne semble avoir eu aucun effet sur la demande d'énergie électrique.

Au cours des 25 dernières années, l'augmentation de la production électrique atteignait presque 7,5 pour cent de moyenne annuelle composée. Durant la période de 10 ans qui s'étend du 31 mars 1930 à 1940, l'augmentation moyenne a été annuellement de 8,7 pour cent. De 1940 à 1955, le taux moyen d'augmentation est tombé à 6,8 pour cent, mais au cours de cette période, les restrictions dues à l'insuffisance des moyens de production retardèrent l'augmentation de la consommation.

On estime que pour satisfaire la demande normale des usagers, il faudra augmenter la production, au cours de la période allant de 1955 à 1965, de 7,6 pour cent par an (moyenne composée) et de 6 pour cent chaque année jusqu'en 1975. On pense que l'augmentation atteindra 5,6 pour cent pour la dernière année. Le tableau ci-dessous indique la consommation effective de 1955 et les consommations prévues pour 1965 et 1975.

Demande d'énergie électrique
Consommation prévue pour les années à venir

	Exercice se terminant le 31 mars		
	1955	*1965*	*1975*
Maximum de consommation en MW	918	1 900	3 400
Production en MW . .	4 382	9 150	16 450

Original : anglais.

La consommation d'énergie en Norvège

par F. Vogt *

Dans le passé, la Norvège a couvert ses besoins en énergie d'une manière qui, dans une certaine mesure, lui était propre et qui n'était pas la même que celle d'autres pays; on peut penser qu'il continuera d'en être ainsi dans l'avenir.

La Norvège est un pays montagneux, et sa population est clairsemée. Si elle possède d'abondantes ressources hydrauliques, elle n'a, à proprement parler, ni houille, ni pétrole, ni gaz naturel. Les mines des îles arctiques du Spitzberg, qui appartiennent à la Norvège, ne lui fournissent qu'une partie du charbon dont elle a besoin. La situation septentrionale du pays explique la consommation d'une grande quantité d'énergie pour le chauffage domestique. Autrefois, on utilisait comme sources de chaleur le bois de feu et la tourbe; mais actuellement, le bois est une matière première trop précieuse pour être brûlée, à l'exception de quelques déchets. On a donc dû importer, au cours des années récentes, des quantités considérables de charbon et de pétrole, principalement de ce dernier produit. Les importations de combustible constituant une lourde charge pour l'économie nationale, la couverture des besoins en énergie est assurée, de plus en plus, par l'électricité d'origine hydraulique.

La population de la Norvège est passée de 2,23 millions d'habitants en 1900 à 3,40 millions en 1954. En même temps, la consommation totale d'énergie par personne est passée, en équivalent de charbon, de 1,45 tonne à 4,2 tonnes. Pour obtenir ces chiffres, on a calculé l'équivalent en charbon d'un combustible autre que le charbon en tenant compte du pouvoir calorifique de ce combustible et, pour l'énergie hydroélectrique, on a admis le taux de conversion de 1 kWh = 0,4 kg de charbon de qualité supérieure.

Les approvisionnements de combustibles contenus dans les soutes des navires norvégiens à l'étranger ne sont pas compris dans les chiffres précédents. Actuellement, en utilisant les taux de conversion mentionnés ci-dessus, ces approvisionnements s'élèvent à environ 50 pour cent de la consommation d'énergie nationale, ce qui porte le total à plus de 6 tonnes par personne.

Abstraction faite du contenu des soutes de navires, on admettait qu'en 1900 le bois de feu et la tourbe représentaient environ 31 pour cent de la consommation d'énergie en Norvège, les combustibles solides fossiles 47 pour cent, les combustibles liquides 19 pour cent et l'énergie hydroélectrique (qui, à l'époque, était surtout utilisée pour la force motrice) 3 pour cent seulement. En 1954, les proportions étaient respectivement de 5, 9, 24 et 62 pour cent. L'emploi des combustibles liquides s'est beaucoup développé au détriment de celui des combustibles solides, mais c'est surtout en faisant appel aux ressources hydrauliques pour la production d'électricité que la consommation d'énergie s'est accrue comme elle l'a fait.

Le taux de conversion kilowattheure/charbon présente donc une grande importance dans l'examen des problèmes de l'énergie en Norvège. S'il est vrai qu'une centrale thermique moderne doive consommer 0,4 kg de charbon de qualité supérieure pour débiter 1 kWh dans le réseau de distribution, en revanche un emploi très développé de l'énergie hydroélectrique pour le chauffage pourrait justifier l'utilisation d'un taux de conversion moins élevé. Employé pour le chauffage de bouilleurs électriques, un kilowattheure équivaut en réalité à 0,16 kg de charbon seulement, alors que pour le chauffage domestique l'équivalent peut atteindre 0,3 kg. Si l'on utilise l'équivalence 1 kWh = 0,2 kg de charbon au lieu de 0,4 kg — ce chiffre de 0,2 kg étant considéré comme le minimum absolu du taux de conversion — la consommation totale d'énergie en Norvège représente 1,43 tonne par habitant en 1900 et 2,89 tonnes en 1954, la contribution de l'énergie hydroélectrique se montant maintenant à 45 pour cent. En employant ce taux de conversion, il apparaît que la consommation d'énergie par habitant double tous les 53 ans, ou même tous les 33 ans, dans le cas d'une population croissante.

La Norvège étant sans doute appelée, dans l'avenir, à utiliser de plus en plus d'énergie électrique pour les différentes sortes de chauffage — fonderies, chaudières, fourneaux — il serait peut-être préférable de fonder les estimations sur le plus faible des taux de conversion précités.

En 1954, la production d'énergie électrique s'est élevée en Norvège à $21,9 \times 10^9$ kWh, soit 6 450 kWh par habitant. Les centrales thermiques n'interviennent d'ordinaire dans ce total que pour 0,2 à 0,3 pour cent; le reste, c'est-à-dire la quasi-totalité,

---

Original : anglais.

* Directeur général de l'Office norvégien des cours d'eau et de l'énergie électrique.

provient des centrales hydrauliques. Si la consommation d'électricité par habitant est en Norvège très supérieure à celle de tout autre pays, ceci est dû uniquement à la modicité de son prix. Cette circonstance a favorisé l'expansion de l'industrie électrochimique et de l'industrie métallurgique, qui consomment beaucoup de courant, ainsi que le développement très poussé des utilisations domestiques de l'électricité — non seulement pour l'éclairage, les appareils ménagers courants, la cuisine et la fourniture d'eau chaude — mais encore pour le chauffage des maisons. En Norvège, l'électricité est un moyen de chauffage beaucoup moins onéreux que les combustibles.

Pour un taux d'utilisation de 70 pour cent, l'énergie électrique produite par les centrales hydrauliques appartenant au gouvernement est actuellement vendue au prix moyen de 0,21 cent des États-Unis d'Amérique par kilowattheure, après transport vers les centres de consommation, où la tension est ramenée en général à 60 kV. Ce prix comprend l'intérêt des capitaux investis, l'amortissement et les dépenses d'exploitation.

Le *Livre blanc* britannique de février 1955 sur l'énergie nucléaire mentionne le prix de revient de 0,6 penny, soit 0,7 cent des États-Unis d'Amérique le kilowattheure pour l'énergie produite par les centrales thermiques les plus modernes; ce prix s'entend au départ de la centrale, c'est-à-dire qu'il ne comprend pas le transport, et n'est valable qu'au minimum de charge. Le Royaume-Uni estime que le prix de l'énergie électrique produite dans ses futures centrales nucléaires sera à peu près le même. Or, cette estimation repose sur un certain nombre d'hypothèses plus ou moins optimistes. En y ajoutant le transport, et surtout en tenant compte des points de charge, le prix de revient du kilowattheure serait naturellement beaucoup plus élevé, en particulier dans le cas des centrales nucléaires.

Le prix actuel de l'énergie électrique d'origine hydraulique produite en Norvège est donc très inférieur au tiers du prix mentionné dans les estimations faites au Royaume-Uni pour l'énergie nucléaire. On a évidemment aménagé en premier lieu un grand nombre des sites les plus favorables à la production d'électricité d'origine hydraulique. L'énergie provenant de sites nouveaux sera peut-être plus onéreuse, surtout lorsqu'il faudra mettre en valeur les dernières ressources.

On a calculé qu'en utilisant au maximum tous les sites favorables, il serait possible à la Norvège de se procurer une quantité annuelle d'énergie assurée en tout temps de 110 milliards de kilowattheures, auxquels s'ajouteraient, dans les années de précipitations abondantes, en moyenne 10 autres milliards de kilowattheures supplémentaires. Il faudrait toutefois, pour obtenir ce résultat, inonder de vastes étendues de terrain où se trouvent des forêts et des terres arables; or, la superficie des terres productives de la Norvège est déjà insuffisante. Il semble donc préférable de ramener le total de 110 à 90 ou 100 milliards de kilowattheures. On peut admettre que la moitié de cette énergie serait à bas prix, à très bas prix même, si l'on se réfère au niveau des prix dans les autres pays, le reste étant d'un prix moyen, et peut-être même élevé pour une petite quantité.

Si le taux cumulatif d'accroissement annuel de la population norvégienne a été en moyenne de 0,78 pour cent de 1900 à 1954, les dernières estimations indiquent un ralentissement dans les années qui viennent; c'est ainsi que, de 1965 à 1970, l'accroissement prévu est de 0,55 pour cent. Les estimations concernant un avenir plus éloigné n'ont guère de valeur.

La consommation d'énergie par habitant sera sans doute fonction dans l'avenir du niveau de vie et du degré de mécanisation de la production, mais aussi, dans une grande mesure, des améliorations apportées à l'utilisation de l'énergie. Ce genre d'amélioration est bien connu en ce qui concerne l'industrie. Toutefois, il y aurait aussi de grands avantages à adopter, dans la technique du bâtiment, des procédés améliorés pour la construction et le chauffage. En Norvège, le chauffage à l'électricité, notamment, a provoqué une véritable révolution dans ce domaine, et il permet des économies d'énergie. Il semble donc probable que l'accroissement de la consommation d'énergie par habitant se fera à une cadence plus lente à l'avenir.

En admettant que l'accroissement de la population et celui de la consommation d'énergie par habitant se ralentissent l'un et l'autre, et en employant le taux de conversion 1 kWh = 0,2 kg de charbon, on a estimé que l'augmentation annuelle de la demande totale d'énergie au cours des 25 prochaines années devrait être de 1,6 à 2 pour cent. Selon cette estimation, la demande doublerait au bout d'une période comprise entre 35 et 44 ans, mais on ne peut s'attendre à ce qu'elle continue à doubler indéfiniment. On ne peut guère espérer que l'emploi de l'énergie hydroélectrique fera disparaître la pratique de brûler des déchets de bois et de la tourbe; des quantités réduites d'autres combustibles pourront également être nécessaires dans l'avenir. L'industrie a besoin du charbon et de ses dérivés comme produits chimiques. D'autre part, il est improbable que l'énergie électrique d'origine hydraulique puisse servir indirectement, dans une mesure importante, à la propulsion de véhicules ou de navires. L'électricité ne pourrait donc pas, dans l'avenir, couvrir plus de 65 à 70 pour cent de la demande totale d'énergie. C'est pour cela que les besoins annuels en énergie électrique pour 1980 ont été estimés entre 43 et 51 milliards de kWh.

Il résulte de cette estimation que l'accroissement de la consommation d'énergie est principalement fonction de la mise en valeur des ressources hydrauliques. Il existe en Norvège suffisamment de sites où l'on pourrait produire de l'énergie à bon marché pour couvrir cet accroissement. Toujours selon cette estimation, la consommation totale de com-

bustibles resterait à peu près au même niveau au cours des prochaines décennies.

Si l'électricité obtenue à partir de l'énergie nucléaire ne semble pas devoir, pour de longues années encore, être en mesure d'affronter la concurrence de l'électricité d'origine hydraulique à bon marché, la concurrence se présentera peut-être d'une autre façon en ce qui concerne la production d'énergie thermique à vapeur. C'est ainsi qu'il semble probable que les industries norvégiennes qui font largement appel à la vapeur pour certains procédés de fabrication pourront avantageusement utiliser des centrales nucléaires. Il peut en être de même pour le chauffage urbain à vapeur dans des régions à forte densité de population. Dans ce cas, la quantité d'électricité d'origine hydraulique nécessaire en 1980 se trouverait quelque peu réduite.

Pour un avenir éloigné, il est inévitable que des prévisions de ce genre aient un caractère très aléatoire. C'est ainsi qu'une pénurie d'énergie à bon marché en Europe pourrait entraîner l'installation en Norvège d'industries faisant une grosse consommation d'énergie; en ce cas, leur nombre dépasserait nos estimations. Seule, la possibilité d'obtenir de l'énergie d'origine hydraulique à bon marché constitue ici une limite précise. Il ne semble donc pas justifié d'établir des prévisions au delà de 1980. Une prévision pour 1980 a peut-être déjà un caractère trop aléatoire.

Même si la demande d'électricité devait, en 1980 ou ultérieurement, être notablement plus forte, on disposerait encore de sites favorables à la production d'énergie après la mise en valeur des ressources hydrauliques du pays conformément aux estimations ci-dessus. Le prix de revient du kilowattheure augmenterait peut-être, mais il y a encore un grand pas à franchir avant qu'il se rapproche de l'estimation du prix de l'énergie électrique produite par les centrales nucléaires britanniques.

Il n'a été question dans le présent mémoire que de l'énergie consommée sur le territoire de la Norvège; les besoins très élevés de la flotte marchande norvégienne n'ont pas été examinés. Dès que l'énergie nucléaire pourra affronter la concurrence des autres formes d'énergie, elle remplacera certainement les combustibles classiques pour la propulsion des navires.

Les besoins en énergie du Pakistan au cours des vingt prochaines années et la nécessité pour ce pays d'avoir recours à l'énergie nucléaire

Actuellement, la consommation annuelle d'énergie électrique au Pakistan, dont la population dépasse 76 millions d'habitants et s'accroît à la cadence d'un million par an, n'est que de 5 kilowattheures par personne. Toute tentative en vue de relever le niveau de vie de la population pakistanaise doit donc nécessairement s'accompagner d'un développement considérable des installations génératrices d'énergie. En raison des conditions particulières dans lesquelles se trouve le Pakistan, l'électricité y est un produit de toute première nécessité, dont on a besoin, par exemple, pour l'asséchement de terres submergées par les inondations dans le Pakistan oriental, pour l'irrigation par pompage en vue de compenser l'insuffisance des pluies, et pour la remise en culture, dans le Pakistan occidental, de vastes étendues de terres salines qui tombent en friche. Il faut aussi de l'énergie pour faire fonctionner les industries qui traitent les matières premières du pays, comme le coton, le jute, etc., pour fabriquer les produits essentiels, pour produire des engrais afin d'améliorer les rendements agricoles, actuellement faibles, et pour mettre en valeur les importantes ressources minières du pays. L'économie du Pakistan étant surtout agricole et la majeure partie de sa population vivant dans de petites villes et des villages, il faut prendre des mesures pour l'aménagement des campagnes, ce qui suppose également de l'énergie électrique en abondance.

ESTIMATION DES BESOINS EN ÉNERGIE

Le Pakistan a été constitué après la dernière guerre mondiale, et il s'est trouvé que ce pays, dont la superficie couvre 360 000 milles carrés (932 400 km²) et dont la population dépasse 76 millions d'habitants, n'avait qu'une puissance installée de 75 000 kW. Pleinement conscient de l'importance primordiale de l'énergie électrique pour le pays, le Gouvernement du Pakistan prit aussitôt des mesures pour évaluer les besoins du pays dans ce domaine, et, avec l'aide de techniciens et d'experts étrangers, mit en route l'exécution d'un plan à court terme et d'un plan à long terme pour le développement de la production d'énergie. Le plan à court terme prévoyait la construction de quelques centrales thermiques, à génératrices diesel et à vapeur, et l'utilisation des dénivellations des canaux. Grâce à la réalisation de ce plan, la puissance installée est passée au cours des quelques dernières années de 75 000 kW à 180 000 kW et elle permet maintenant de satisfaire une demande maximum de 128 000 kW. Malgré cela, il subsiste une demande non satisfaite s'élevant à près de 425 000 kW.

Répartition par régions de la demande non satisfaite

La demande actuellement non satisfaite a été évaluée au moyen d'enquêtes approfondies, effectuées par les services provinciaux de l'électricité et par des ingénieurs consultants en collaboration avec l'Office central de l'électricité. Cette demande se répartit comme suit :

	En milliers de kW
1. *Pakistan occidental :*	
a) Région du Nord et du Nord-Ouest (Provinces du Pendjab et de la frontière nord-ouest)	200
b) Région du Centre et du Sud (Provinces du Sind, du Béloutchistan et de Karachi)	125
2. *Pakistan oriental*	100
TOTAL	425

Demandes prévues en 1965, en 1975 et en 2000

Ces enquêtes ont en outre fait apparaître que les besoins en électricité de l'ensemble du pays s'établiraient dans dix ans à 1 180 000 kW au minimum, se répartissant comme suit :

	En milliers de kW
1. *Pakistan occidental :*	
a) Région du Nord et du Nord-Ouest	500
b) Région du Centre et du Sud	290
2. *Pakistan oriental*	390
TOTAL	1 180

Le taux composé d'accroissement correspondant à ces prévisions serait de 8 pour cent par an, ce qui est considéré comme raisonnable. Après 1965, le retard initial dans la satisfaction de la demande étant comblé, on pense que le taux se réduira à 5 pour cent. La demande en 1975 est donc estimée à 1 913 000 kW et l'on prévoit qu'elle s'élèvera à 6 430 000 kW en l'an 2000.

Original : anglais.

RESSOURCES EN ÉNERGIE

L'obstacle le plus grave que rencontre le développement économique du pays est l'absence de ressources d'énergie appropriées. L'exposé ci-après de la situation en ce qui concerne les différentes sources d'énergie le montre bien.

Charbon

Le Pakistan est pauvre en charbon. Pour des besoins mensuels minima qui dépassent 200 000 tonnes, la quantité totale actuellement produite, qui ne provient que de la partie occidentale du pays, est à peine de 50 000 tonnes. Les gîtes qui jusqu'à présent ont été évalués par des experts représentent environ 100 millions de tonnes. On pense que les plus importants de ces gîtes sont situés dans les terrains salins du Pendjab et dans les zones montagneuses du Béloutchistan; certains se trouveraient à des emplacements tout à fait défavorables pour l'extraction, le transport et pour une exploitation rentable. La plupart des gîtes se présentent sous forme de deux filons entre lesquels s'intercale une épaisse couche de schistes. Les différents filons ont des puissances allant de un à quatre pieds (0,30 m à 1,20 m) et ils sont coupés d'argile et de bandes calcaires. Cette disposition exclut une mécanisation poussée de l'extraction.

Le pouvoir calorifique des différentes espèces de charbon du Pakistan va de 7 000 à 10 000 Btu. Leur composition est extrêmement variable, suivant les espèces; ils ont une teneur élevée en humidité naturelle, en cendres, en soufre et en résine. Ils sont en outre sujets à des phénomènes de combustion spontanée, ce qui rend leur manutention, leur transport et leur stockage extrêmement difficiles. Ces inconvénients les rendent dans l'ensemble impropres à la production massive d'énergie électrique.

La quantité de charbon restreinte actuellement extraite sert à la cuisson des briques dans des fours et des petits fourneaux de recuisson. La majeure partie du charbon dont le pays a actuellement besoin pour les chemins de fer, l'industrie, etc., doit donc être importée de l'étranger, et le coût en est élevé.

Pétrole

Des forages effectués récemment avec persévérance n'ont révélé aucune réserve appréciable de pétrole ni dans le Pakistan occidental ni dans le Pakistan oriental, à l'exception d'un gisement pétrolifère dans le district d'Attock au Pendjab (Pakistan occidental). Il y a dans ce district environ huit puits en activité depuis un certain nombre d'années; mais ils produisent à peine 15 pour cent de la quantité actuellement indispensable au pays.

La consommation totale de pétrole s'est élevée en 1954 à 1 463 494 tonnes, dont la production locale n'a pu fournir que 232 030 tonnes. La construction de centrales à combustible liquide obligerait donc à dépenser des devises étrangères.

Bois de feu

Les zones forestières ne représentent qu'une très faible proportion de la superficie du Pakistan. La petite quantité de bois que peuvent fournir les forêts doit être réservée pour la construction, la fabrication de papier, de papier journal, etc., enfin pour les usages domestiques. Il n'en reste que bien peu pour la production d'énergie.

Gaz naturel

Du gaz naturel (contenant 90 pour cent de méthane) a été récemment découvert à Sui dans le Béloutchistan (Pakistan occidental). Le Gouvernement du Pakistan s'est immédiatement occupé d'en assurer l'exploitation et de le transporter à Karachi par pipe-line. Toutefois, la nappe n'est pas considérable et la majeure partie du gaz servira à la fabrication de produits chimiques et d'engrais, dont le pays a besoin de toute urgence. On envisage cependant d'utiliser au début une partie de ce gaz pour actionner une centrale d'une puissance installée de 127 000 kW, située à Kotadu (Pakistan occidental).

Énergie hydraulique

Dans le partage du sous-continent indo-pakistanais, le Pakistan s'est trouvé privé des ressources hydrauliques que l'on peut tirer des fleuves suivants: le Chenab, le Ravi, le Sutlej, le Gange et le Brahmapoutre. La puissance hydraulique qui existe à l'état potentiel dans le pays se trouve en majeure partie à l'extrémité nord du Pakistan occidental, c'est-à-dire à des centaines de milles des centres de consommation; sa mise en valeur est donc difficile, et le transport de l'électricité produite rendrait l'exploitation peu rentable dans l'ensemble. Les sites naturels qui se prêtent à l'aménagement de bassins d'accumulation sont peu nombreux, et la quantité de vase charriée par les fleuves du Pakistan est si importante que tout réservoir aménagé, quel qu'il soit, risque de ne pas durer longtemps. Dans ces conditions, il devient impossible de réduire sérieusement le montant des capitaux investis à imputer à la production d'énergie hydroélectrique, la proportion de capitaux pouvant être affectés à l'irrigation étant très faible. L'absence de bassins provoque en outre d'amples fluctuations saisonnières dans la production d'électricité d'origine hydraulique et des centrales thermiques sont de toute façon nécessaires pour assurer la continuité de la production.

Le plan à long terme de développement de l'énergie du Pakistan prévoit l'exploitation de toutes les ressources hydrauliques du pays susceptibles d'être rentables, comme Warsak, Mangla, etc., soit une puissance totale installée de 612 000 kW dans le Pakistan occidental, Karnafully représentant une puissance installée de 160 000 kW dans le Pakistan oriental. Dans le Pakistan occidental, on doit pouvoir aménager, à partir de 1975, un complément de 300 000 kW de puissance hydraulique assurée en tout temps. Dans le Pakistan oriental, qui est

une région plate, on ne pense pas, Karnafully mis à part, trouver de sites favorables à la production d'énergie hydroélectrique.

RESSOURCES DU PAKISTAN EN MATIÈRES PREMIÈRES POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Jusqu'à présent, on n'a fait, au Pakistan, aucune prospection systématique en vue de découvrir des sources de matières fissiles comme l'uranium et le thorium. Cependant, des arrangements ont été conclus pour s'assurer les services d'un géologue qualifié qui explorera le pays pour y rechercher ces minerais. Les spécialistes pakistanais qui ont effectué des recherches préliminaires, estiment qu'ils pourront trouver des gisements de ces minerais, si on leur fournit les moyens nécessaires.

DIFFÉRENCE ENTRE LES BESOINS EN ÉNERGIE ET LES RESSOURCES EXISTANTES ET POTENTIELLES

La capacité actuelle de production des différentes centrales est la suivante (en milliers de kilowatts) :

Centrales	I Pakistan occidental	II Pakistan oriental	I + II Total
Hydrauliques .	63	—	63
A vapeur . . .	61	6	67
Diesel	44	6	50
TOTAL . .	168	12	180

La puissance totale installée est donc actuellement de 180 000 kW, mais la puissance assurée en tout temps n'est que de 128 000 kW.

Les projets d'équipement électrique en cours d'exécution et ceux dont on envisage la réalisation sont les suivants :

Projets en cours d'exécution dont on pense que la réalisation sera terminée en 1960 (en milliers de kilowatts) :

Centrales	I Pakistan occidental	II Pakistan oriental	I + II Total
Hydrauliques .	249	80	329
A vapeur . . .	154	40	194
Diesel	3	42	45
TOTAL . .	406	162	568

La puissance installée complémentaire représentera donc, en 1960, un total de 568 000 kW, le complément de puissance assurée étant de 439 000 kW.

Projets faisant partie du plan à long terme, dont on espère que la réalisation sera terminée en 1965 (en milliers de kilowatts) :

Centrales	I Pakistan occidental	II Pakistan oriental	I + II Total
Hydrauliques .	300	80	380
A vapeur . . .	127	30	157
TOTAL . .	427	110	537

Le complément de puissance installée sera donc, en 1965, de 537 000 kW, mais il ne représentera qu'une puissance assurée en tout temps de 399 000 kW.

La puissance installée qui, en 1960 et en 1965, sera assurée en tout temps, est indiquée ci-après :

Puissance assurée en 1960 :	*En milliers de kW*
Existante	128
Nouvelle	439
Total	567
A retrancher : centrales à vapeur et diesel déclassées	45
Total de la puissance assurée en 1960	522

Puissance assurée en 1965 :	*En milliers de kW*
Existante (en 1960)	522
Nouvelle (1960-1965)	399
Total	921
A retrancher : centrales à vapeur et diesel déclassées	85
Total de la puissance assurée en 1965 .	836

Selon une estimation prudente, les besoins en énergie se monteraient à 1 180 000 kW en 1965 et à 1 913 000 kW en 1975; il y aurait donc un déficit important. On trouvera en annexe un tableau indiquant l'écart entre les besoins et la puissance assurée disponible. On verra dans ce tableau que la demande d'électricité est nettement supérieure à l'énergie fournie tant par les centrales hydrauliques projetées que par les centrales thermiques, pour lesquelles il n'existe pas de combustible dans le pays, mais qu'il est cependant nécessaire de construire. Le Pakistan ne dispose d'aucun combustible naturel utilisable pour la production massive d'énergie; pour combler l'écart existant entre la demande et les quantités disponibles, le mieux est donc de faire appel à l'énergie nucléaire.

RÉGIONS OU L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE POURRAIT UTILEMENT ÊTRE EMPLOYÉE

Pour ce qui est des centres de consommation, le Pakistan occidental se divise en deux zones distinctes. Dans la zone septentrionale, qui comprend le Pendjab et la Province de la frontière du nord-ouest, la majeure partie de la demande sera satisfaite à l'aide des ressources hydrauliques du nord-ouest. La zone méridionale, composée de la province du Sind, du Béloutchistan et de la province de Kara-

Tableau indiquant la demande d'énergie électrique, la puissance installée assurée en tout temps et l'écart entre l'une et l'autre, en milliers de kilowatts (1955-2000)

Année	Demande			Puissance installée assurée en tout temps			Déficit		
	Pakistan oriental	Pakistan occidental	Total	Pakistan oriental	Pakistan occidental	Total	Pakistan oriental	Pakistan occidental	Total
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1955 . . .	110	443	553	10	118	128	1 000	325	425
1960 . . .	268	536	804	143	379	522	125	157	282
1965 . . .	390	790	1 180	183	652	836	207	37	344
1970 . . .	496	1 007	1 403	183	653	836	313	354	667
1975 . . .	631	1 282	1 913	183	653	836	448	629	1 077
1980 . . .	805	1 635	2 440	183	953	1 136	622	622	1 304
1985 . . .	1 025	2 080	2 105	183	953	1 136	842	1 127	1 969
1990 . . .	1 310	2 650	3 960	183	953	1 136	1 127	1 697	2 824
1995 . . .	1 670	3 380	5 050	183	953	1 136	1 487	2 427	3 914
2000 . . .	2 130	4 300	6 430	183	953	1 136	1 947	3 347	5 294

chi, n'a pas de ressources hydrauliques valant d'être mentionnées. C'est une région presque sèche, où le développement de l'agriculture et de l'industrie ne peut se faire si l'on ne dispose pas d'énergie; l'énergie nucléaire pourrait rendre de très grands services dans cette région du Pakistan occidental.

Les seules ressources hydroélectriques du Pakistan oriental se trouvent à Karnafully; une centrale de 160 000 kW y est en cours d'aménagement, mais sa puissance assurée sera seulement de 72 000 kW, ce qui montre que là aussi il faudra faire appel à l'énergie nucléaire.

Les ressources des Philippines en énergie électrique et en combustibles

par Filemon G. Rodriguez* et Conrado S. Ramirez**

On s'accorde communément à reconnaître le rôle important que l'énergie électrique et les combustibles jouent à notre époque dans le développement des divers secteurs de l'économie nationale. Avec les matières premières, le capital et le travail, ils constituent les éléments indispensables à la production des biens qui satisfont les besoins de l'individu. Grâce à la production d'énergie électrique, les progrès de l'humanité ont été beaucoup plus rapides, et la productivité du travail humain a été largement accrue. L'homme s'est libéré de besognes fastidieuses, il jouit de plus nombreuses heures de loisirs, et il en a retiré santé, bien-être et bonheur. L'énergie électrique a permis de développer les transports et les communications, amenant en contact plus étroit les différentes parties du monde. Les combustibles revêtent une grande importance pour la production de l'énergie et de la chaleur nécessaires pour les usages domestiques et industriels. Sans combustibles, le monde ne serait pas ce qu'il est, et l'homme serait resté le sauvage qu'il était aux premiers âges du monde.

L'énergie électrique et les combustibles sont aussi indispensables aux Philippines qu'à n'importe quel autre pays. Les progrès et le bien-être futurs de notre pays dépendent beaucoup de la mesure dans laquelle il pourra utilement tirer parti des facteurs de production dont il dispose et transformer les matières premières dont la nature l'a doté en des articles finis propres à satisfaire les besoins de sa population. Pour mener à bien cette entreprise, il doit obtenir à bas prix d'abondantes quantités d'électricité et de combustibles.

SOURCES D'ÉNERGIE DANS LE PAYS

Au stade actuel de leur développement, c'est principalement des combustibles et des cours d'eau que les Philippines tirent l'énergie qui leur est nécessaire. L'utilisation d'autres sources d'énergie est insignifiante; aussi ne sera-t-elle pas examinée dans la présente communication.

Les combustibles indigènes qui peuvent être utilisés pour la production d'énergie, de lumière et de chaleur sont le charbon, la bagasse, le charbon de bois, l'alcool, le bois, les coques de noix de coco et la balle de riz, le gaz commercial, les huiles végétales et les ordures ménagères. On a trouvé des traces de pétrole dans diverses régions des îles, notamment dans la péninsule de Bondoc au sud de Luçon, et dans l'île Bantayan, au large de la pointe septentrionale de Cebu, mais on n'a découvert jusqu'ici aucun gisement d'exploitation rentable. En ce qui concerne ces combustibles, seuls le charbon, la bagasse et l'alcool font l'objet de statistiques suffisamment détaillées pour permettre d'évaluer la consommation actuelle et d'établir des prévisions en ce qui concerne l'avenir. Tous ces combustibles sont surtout utilisés pour la production de chaleur. Seul le charbon est utilisé pour produire de l'énergie électrique, et les quantités consommées sont relativement insignifiantes.

Charbon

On trouve du charbon en de nombreuses régions des îles, mais seules quelques mines sont exploitées à des fins commerciales, car la plupart des gisements, outre leur importance limitée, appartiennent à une variété de formation géologique récente à faible pouvoir calorifique. Ceci explique que, jusqu'au début de la deuxième guerre mondiale, les Philippines aient importé la quasi-totalité du charbon qu'elles consommaient.

Le tableau 1 indique les réserves potentielles de charbon des Philippines et leur pouvoir calorifique respectif.

Après la guerre, les importations de charbon ont subi une forte diminution car les centrales alimentées au charbon avaient été détruites et la compagnie d'électricité desservant la région de Manille ainsi que la compagnie des chemins de fer de Manille avaient renoncé au charbon en faveur du pétrole.

Le tableau 2 permet de comparer les tonnages et la valeur de la production indigène avec les tonnages de charbon importé en 1940 ainsi que de 1946 à 1953.

Original : anglais.

* Président du Conseil économique national, précédemment Directeur général de la Société nationale d'électricité.

** Conseiller technique auprès du Conseil économique national, précédemment Ingénieur en chef de la Société nationale d'électricité.

Tableau 1

Réserves potentielles de charbon

Provinces	Pouvoir calorifique moyen (Btu)	Réserves (en tonnes métriques)
1. Quezon (Polilio)	12 110	2 000 000
2. Catanduanes (Panganiban)	12 555	1 000 000
3. Albay (Batan-Liguan) .	9 740	5 000 000
4. Sorsogon (Gatbo) . . .	10 098	100 000[a]
5. Mindoro (Bulalacoa) . .	10 371	180 000[a]
6. Antique (Semirata) . .	10 436	1 600 000
7. Capiz (Buruanga) . . .	Non connue	5 000[a]
8. Masbate (Nabangig) . .	11 342	120 000[a]
9. Negros Occ. (Escalante)	9 990	500 000
10. Cebu : Danao-Compostela	10 019	3 000 000
11. Cebu : Uling-Toledo . .	9 801	1 000 000
12. Cebu : Argao-Mantalongon	11 380	3 000 000
13. Surigao (Lingig)	9 283	500 000
14. Zamboanga (Malangas).	12 444	10 000 000
TOTAL GÉNÉRAL . .		28 005 000

AUTRES LIEUX OU DES GISEMENTS DE CHARBON ONT ÉTÉ SIGNALÉS

Abra	Catanduanes	Bohol
Cagayan	Antique	Negros Occ.
Nueva Vizcaya	Iloilo	Zamboanga
Quezon	Leyte	Davao
Camarines sud	Surigao	Cotabato

[a] Chiffre incertain, aucune étude détaillée à ce sujet.

Le tableau 2 montre que le charbon extrait dans le pays s'est à peu près substitué au charbon importé pendant les années d'après-guerre, alors qu'avant la guerre il ne représenterait que 15 pour cent des besoins totaux. Toutefois, la consommation totale de 1949 à 1953 * n'a atteint en moyenne que 148 075,9 tonnes par an, soit 20 pour cent environ de la consommation de 1940.

Bagasse

La bagasse, ou déchet de canne à sucre, sert actuellement de combustible aux raffineries de sucre. A supposer que chaque tonne de canne à sucre donne 1/8 de tonne de bagasse séchée à l'air, la production de ce déchet s'est chiffrée comme suit :

Production de bagasse[a] (1947-1952)

Campagne	Canne à sucre (tonnage)	Bagasse [b] (tonnage)
1947-1948 . . .	3 256 646	407 081
1948-1949 . . .	5 586 198	698 275
1949-1950 . . .	5 294 344	661 793
1950-1951 . . .	7 413 107	926 638
1951-1952 . . .	9 010 433	1 126 304

[a] *A Handbook of the Sugar and Other Industries in the Philippines*, mai 1953, Sugar News Press, Inc.

[b] Chiffres représentant 1/8 du tonnage de canne à sucre.

Étant donné que la production de sucre ne dépassera probablement pas de beaucoup le niveau atteint en 1952, on peut escompter que la production annuelle de bagasse sèche sera de l'ordre de 1 150 000 tonnes au cours des prochaines années.

Alcool

L'alcool indigène est tiré principalement des mélasses de canne à sucre. La production moyenne**

* Division de statistique, Département de l'agriculture et du commerce.

** Rapports annuels du Percepteur des recettes intérieures, 1948-1952.

Tableau 2

Comparaison entre les tonnages et la valeur de la production indigène, et les tonnages de charbon importé en 1940, et de 1946 à 1953

Année	Importations	Production indigène (en tonnes métriques)	Demande totale	Production indigène en pourcentage des importations	Valeur des importations	Production indigène (en pesos)
1940 . .	362 057,0	61 263	423 320,0	14,5	2 880 195	765 000
1946 . .	4,4	47 392	47 396,4	99,9	76	1 184 800
1947 . .	2,6	73 732	73 734,6	100,0	194	1 664 815
1948 . .	2 289,4	87 747	90 036,4	97,5	47 200	1 951 956
1949 . .	2 223,9	123 336	125 559,9	98,2	92 462	2 679 119
1950 . .	3 087,6	158 822	161 909,6	98,0	51 502	3 420 057
1951 . .	98,7	150 691	150 789,7	100,0	2 352	3 390 553
1952 . .	2 845,0	139 440	142 285,0	98,0	300 536	3 178 668
1953 . .	4 930,3	154 905	159 835,3	97,5	297 140	3 558 625

des exercices financiers 1949 à 1952 s'est élevée à l'équivalent de 27,1 millions de litres d'alcool à 97 pour cent d'éthanol.

La capacité journalière moyenne des distilleries existantes est estimée à 300 000 litres, ce qui représente environ 35 millions de litres pour les cent vingt jours pendant lesquels les distilleries sont exploitées chaque année. Compte tenu de la production actuelle de mélasses, et à supposer que les stocks soient suffisants, on estime que la production de ces distilleries peut atteindre rien moins que 100 millions de litres par an.

RESSOURCES HYDRAULIQUES

Les innombrables fleuves et chutes d'eau des Philippines constituent, grâce à de fortes précipitations annuelles, la plus importante source d'énergie à bon marché du pays.

Nous énumérons au tableau 3 les divers projets de mise en valeur du potentiel hydroélectrique des Philippines. Cette liste ne comprend pas tous les lieux où il serait possible de produire de l'énergie hydroélectrique, mais uniquement les sites déjà reconnus ou ayant fait l'objet d'études cartographiques.

Tableau 3

Projets de mise en valeur du potentiel hydroélectrique des Philippines

Noms des projets par province	Puissance (kWh)	Production annuelle d'énergie (kWh)	État d'avancement des travaux
Abra			
Abra	10 000	40 000 000	Étude de la carte
Antique			
Tibiao nº 1	500	4 000 000	Travaux de reconnaissance topographique
Tibiao nº 2	400	3 200 000	Travaux de reconnaissance topographique
Bohol			
Loboc nº 3	400	3 200 000	Établissement des avant-projets
Oukidnon			
Pulangi (cours supérieur)	12 000	100 000 000	Étude topographique préliminaire
Pulangi (cours inférieur)	176 000	1 540 000 000	Étude topographique préliminaire
Chutes du Maramag (Maramag River)	900	7 500 000	Étude topographique préliminaire
Tagaloan (Sta. Ana)	2 400	20 000 000	Étude de la carte
Tagaloan (IMP.)	4 800	40 000 000	Étude de la carte
Alalum	300	2 500 000	Travaux de reconnaissance topographique
Maunum	1 200	10 000 000	Étude de la carte
Mulita	3 500	30 000 000	Étude de la carte
Maridagao	5 000	48 000 000	Étude de la carte
Cagayan nº 1	28 000	200 000 000	Travaux de reconnaissance topographique
Cagayan nº 2	37 000	250 000 000	Travaux de reconnaissance topographique
Cagayan nº 3	8 300	60 000 000	Travaux de reconnaissance topographique
Sawaga	200	1 200 000	Étude détaillée
Agusan	300	2 200 000	Étude détaillée
Bubunawan	3 000	23 000 000	Travaux de reconnaissance topographique
Bulacan			
Angat	100 000	440 000 000	Établissement des avant-projets
Camarines Nord			
Bosigon	1 700	9 800 000	Établissement des avant-projets
Camarines Sud			
Barit (Centrale de Barit)	2 800	18 000 000	Établissement des avant-projets
Cebu			
Chutes du Mantayupan	450	3 500 000	Établissement des avant-projets
Cotabato			
Maridagao	5 000	48 000 000	Étude de la carte
Kulaman	1 200	10 500 000	Étude de la carte
Lac Sebu-Alah	16 000	140 000 000	Étude de la carte
Buayan	2 500	21 500 000	Étude de la carte
Lun Pequeño	4 700	41 000 000	Étude de la carte

Tableau 3 *(suite)*

Noms des projets par province	Puissance (kWh)	Production annuelle d'énergie (kWh)	État d'avancement des travaux
Davao			
Talomo nº 1	300	2 300 000	Établissement des plans définitifs
Talomo nº 2	1 200	9 600 000	Étude détaillée
Sibulan (initial)	750	5 800 000	Étude topographique préliminaire
Sibulan (complémentaire)	3 750	28 700 000	Étude topographique préliminaire
Sampao	200	1 700 000	Travaux de reconnaissance topographique
Iloilo			
Jalaud	5 400	22 000 000	Travaux de reconnaissance topographique
Laguna			
Dampalit	264	1 638 000	Établissement des avant-projets
La Union			
Chutes d'Amburayan (groupe nº 2)	200	1 700 000	Établissement des avant-projets
Lanao			
Agus nº 1	67 000	378 000 000	Étude détaillée
Agus nº 2	119 000	880 000 000	Étude détaillée
Agus nº 3	154 000	1 088 000 000	Étude détaillée
Agus nº 4	24 000	173 000 000	Étude détaillée
Agus nº 5	127 000	951 000 000	Étude détaillée
Agus nº 6			
Maria Cristina nº 3	50 000	320 000 000	Étude détaillée
Maria Cristina nº 4	50 000	320 000 000	Étude détaillée
Maria Cristina nº 5	50 000	320 000 000	Étude détaillée
Agus nº 7	45 000	260 000 000	Étude détaillée
Leyte			
Naliualan	400	3 000 000	Travaux de reconnaissance topographique
Bao	400	3 000 000	Travaux de reconnaissance topographique
Binahaan	600	5 200 000	Étude de la carte
Misamis oriental			
Odiogan	800	7 000 000	Étude de la carte
Province de la montagne			
Abulug nº 1	72 000	315 000 000	Étude de la carte
Abulug nº 2	54 000	236 000 000	Étude de la carte
Agno nº 3 (Itogon)	10 000	59 000 000	Établissement des avant-projets
Agno nº 4 (Tabu)	75 000	324 000 000	Établissement des avant-projets
Toboy nº 1 (Tayum)	45 000	180 000 000	Établissement des avant-projets
Toboy nº 2 (Kalipkip)	50 000	153 000 000	Établissement des avant-projets
Toboy nº 3 (Lubas)	75 000	204 000 000	Établissement des avant-projets
Negros occidental			
Big Caliban	1 000	8 500 000	Étude détaillée
Negros oriental			
Amlan nº 1 (chutes d'Amlan)	800	7 000 000	Étude détaillée
Amlan nº 2 (Silab)	300	2 600 000	Étude détaillée
Amlan nº 3 (Silab)	200	1 500 000	Étude détaillée
Nueva Ecija			
Talavera	300	1 800 000	Établissement des plans définitifs
Quezon			
Agus	10 000	68 000 000	Étude topographique préliminaire
Dumaca (Centrale nº 1)	600	4 100 000	Établissement des plans définitifs
Dumaca (Centrale nº 2)	900	6 500 000	Étude détaillée

Tableau 3 *(fin)*

Noms des projets par province	Puissance (kWh)	Production annuelle d'énergie (kWh)	État d'avancement des travaux
Sorsogon			
Cawayan nº 1	1 800	17 500 000	Étude détaillée
Cawayan nº 2	600	5 000 000	Étude détaillée
Tarlac			
Camiling	2 560	17 000 000	Étude détaillée
Zambales			
Cabatuan	1 200	9 600 000	Travaux de reconnaissance topographique
Caraguay	400	3 000 000	Travaux de reconnaissance topographique
Sto. Tomas	600	5 000 000	Étude de la carte

NOTE. — Les travaux d'étude et l'établissement des projets de mise en valeur des ressources hydroélectriques (du seul point de vue des possibilités de réalisation techniques; l'exploitation peut être rentable ou non) s'effectuent dans l'ordre suivant : 1) étude de la carte; 2) travaux de reconnaissance topographique; 3) étude topographique préliminaire; 4) établissement des avant-projets; 5) étude détaillée; 6) établissement des plans définitifs.

UTILISATION ACTUELLE

Énergie électrique

La force motrice dont les Philippines disposaient en 1953 atteignait au total 10 307 916 HP, se répartissant comme suit :

Centrales électriques alimentant le réseau de distribution	354 043 HP
Centrales industrielles	239 532 HP
Centrales agricoles	243 420 HP
Centrales minières	44 169 HP
Transports (y compris les véhicules à moteur)	9 426 252 HP
TOTAL	10 307 916 HP

En 1953, le nombre total des centrales électriques assurant la fourniture de courant aux abonnés des réseaux publics était de 329, et leur puissance installée, de 244 442 kW, alors que la force motrice développée par les centrales était de 354 043 HP. Cette capacité de production et les chiffres correspondants de la production d'énergie se répartissaient comme suit :

Type	Capacité de production		Production	
	En milliers de kW	En pour cent de la capacité totale	En millions de kWh	En pour cent de la production totale
Thermique .	109,50	44,7	370,54	47,1
Diesel . . .	51,90	21,2	101,00	12,7
Hydraulique . . .	83,40	34,1	317,00	40,2
TOTAL .	244,80	100,0	788,54	100,0

Les chiffres qui précèdent montrent qu'en 1953 les centrales hydrauliques, qui ne représentaient que le tiers de la capacité de production totale des centrales, ont représenté plus des 2/5 de la production totale d'énergie. Sur les 317 millions de kW fournis par les centrales hydrauliques, 242,48 millions de kWh, soit 76,5 pour cent provenaient des centrales de la Société nationale d'électricité et ont été vendus à des compagnies de distribution privées. Les centrales thermiques et les centrales diesel qui consomment des combustibles importés n'ont point leur place dans la présente communication.

D'après le chiffre de la population des Philippines qui, en 1953, a été estimée à 21 221 200 habitants, la puissance installée de toutes les centrales alimentant les réseaux publics était de 11,7 watts par habitant, et la consommation de 31,7 kWh. Ces chiffres sont inférieurs à ceux de la plupart des pays du monde, abstraction faite des pays les moins développés (voir tableau 4).

Combustibles

Actuellement, aucun combustible indigène n'est utilisé pour la production d'énergie électrique. Ils servent principalement à la production de chaleur à l'usage industriel ou domestique.

La production indigène de charbon est entièrement absorbée par la demande intérieure, notamment par la Cebu Portland Cement Company qui est parmi les plus gros consommateurs. Étant donné qu'à l'exception d'un gisement relativement peu important, les charbons philippins ne sont pas cokéfiants, on ne s'attend pas qu'ils soient largement utilisés dans les aciéries. On envisage bien de fabriquer des briquettes et des agglomérés à partir de charbons de qualité médiocre, mais cette fabrication est encore à l'état de projet.

Tableau 4

Puissance installée et production d'énergie de certains pays

Pays	Superficie (en milliers de km²)	Population [a] (en millions d'habitants)	Puissance [b] installée (en milliers de kW)	Puissance installée au km² (kW/km²)	Puissance installée (en kW par milliers d'habitants)	Total de production (en kWh)	Production par habitant (en kWh)
Canada	9 960,2	14,0	9 960	1,0	712	57 400	4 100,0
Suède	440,1	7,1	3 220	7,3	453	12 307 [e]	1 734,0
Royaume-Uni	244,0	50,6	16 895	69,3	334	61 537	1 214,0
États-Unis	7 827,7	154,4	75 775	9,7	491	370 673	2 400,0
Birmanie	677,5	18,7	36 [d]	0,05	1,9	182	9,7
Ceylan	65,6	7,7	42 [c]	0,6	5,5	107,7	14,0
Chine-Formose	36,0	7,7	304 [d]	8,4	39,5	—	—
Fédération malaise	131,0	5,3	131 [d]	1,0	24,7	913	172,0
Hong-Kong	1,0	2,0	106	106,0	53,0	354	177,0
Inde	3 288,2	356,8	2 409 [c]	0,7	6,6	5 852	16,4
(Indochine, Cambodge, Laos, Viet-Nam)	1 410,8 [a]	55,0	79 [d]	0,06	1,4	217	4,0
Indonésie	1 491,6	76,5	140 [d]	0,09	1,8	362 [d]	4,7
Japon	368,3	84,3	8 941	24,2	106,0	41 108	478,0
Pakistan	947,7	75,8	82 [d]	0,09	1,1	222,1	2,9
Philippines (1953)	299,7	21,2	244,8	0,8	11,5	788,54	37,1
Singapour	0,8	1,0	37 [d]	46,2	37,0	158,3 [d]	158,3
Thaïlande	511,9	18,8	32 [c]	0,06	1,7	68,8	3,7

[a] Estimations à fin juin 1951, sauf pour les Philippines.
[b] Chiffres les plus récents; totaux pour les centrales alimentant les réseaux de distribution.
[c] Toutes centrales.
[d] Chiffres pour la période 1948-1950.
[e] Chiffres pour 1949.

Sources des données de base: Annuaire statistique des Nations Unies pour 1952; *Étude économique sur l'Asie et l'Extrême-Orient*, 1951.

Environ 70 pour cent de la production de bagasse est utilisée comme combustible par les principales raffineries de sucre, et le reste se perd. On envisage d'utiliser la bagasse pour la fabrication du papier et de la rayonne.

Actuellement, la production d'alcool est en partie utilisée pour fabriquer des boissons alcoolisées, en partie par l'industrie et en partie comme carburant. Ces différentes utilisations sont approximativement de l'ordre de 57 pour cent, 5 pour cent et 38 pour cent respectivement.

Faute de données, il est impossible d'évaluer dans quelle mesure on utilise les autres combustibles indigènes; mais ils sont surtout employés à des usages domestiques.

Ressources potentielles

Énergie hydraulique. — Sur la base des études effectuées jusqu'ici par la Société nationale d'électricité, on estime qu'il est possible d'exploiter dans des conditions rentables environ 1,8 million de kW de la capacité de production hydroélectrique qui permettrait de produire 10,8 millions de kWh.

Combustibles. — A l'exception de la bagasse, on n'a pas déterminé les ressources potentielles maxima en ce qui concerne les autres combustibles. Comme on l'a déjà indiqué, il n'est guère probable que les disponibilités en bagasse dépassent de beaucoup le chiffre actuel de 1 200 000 tonnes de bagasse séchée à l'air.

En ce qui concerne le charbon indigène, les travaux de prospection en cours ont montré l'existence de réserves évaluées à 28 millions de tonnes métriques, soit un peu plus du triple des quantités déjà extraites. On s'attend que ce chiffre augmente fortement à mesure que la prospection se poursuivra.

Pour ce qui est de l'alcool, on estime qu'il serait facile d'assurer chaque année la production de 100 millions de litres à 95 pour cent d'éthanol sans qu'il soit nécessaire d'accroître la capacité de production des distilleries existantes, mais à condition de disposer d'une capacité d'emmagasinage suffisante pour les mélasses.

Il sera facile d'accroître la capacité de production d'énergie électrique si l'on obtient les crédits nécessaires. La mise en œuvre de la partie du programme de développement économique relative à la production d'énergie électrique devrait permettre d'installer au cours des cinq prochaines années une puissance supplémentaire de 320 000 kW qui assurera la production de 224 millions de kWh.

Problèmes

Outre le problème éternel de la pénurie de capitaux, les difficultés auxquelles se heurte la mise en valeur des ressources en énergie et en combustibles peuvent être résumées comme suit :

1. Absence de données statistiques, topographiques et hydrographiques.
2. Nécessité de développer la prospection des nouveaux gisements de combustibles minéraux.

Sources et besoins d'énergie au Portugal

par Alberto Abecasis Manzannarés

La production d'énergie électrique au Portugal, qui s'est développée très lentement jusqu'à la fin de la dernière guerre, s'est accrue à un rythme accéléré depuis 1946 et on s'attend que cette tendance se maintienne à l'avenir. Les chiffres suivants justifient cette opinion :

Année	Production (en millions de kWh)			Taux d'augmentation (pour cent)
	Énergie thermique	Énergie hydraulique	Total	
1927 . .	132	55	187	7,8
1938 . .	300	126	426	5,2
1946 . .	321	317	638	10,2
1950 . .	505	437	942	15,1
1954 . .	205	1 450	1 655	—

Une diminution progressive s'est en outre manifestée dans la proportion de production provenant des centrales thermiques, en raison des caractéristiques économiques du pays, car cette énergie provenait en majeure partie (70 pour cent environ) de combustibles importés. Pour évaluer la consommation, il faut donc diminuer la production dans la proportion d'à peu près 16 pour cent, correspondant à la consommation dans les usines, gaspillage compris.

On voit que, malgré le grand développement de la production, au cours de ces dernières années, la consommation d'énergie électrique au Portugal s'exprime en chiffres assez bas; près de 30 pour cent de la population en effet ne dispose pas d'électricité; de plus, la population non consommatrice occupe la majeure partie du territoire et la consommation par habitant, si l'on considère la population dans son ensemble, est bien inférieure à la moyenne mondiale. En effet, le chiffre ne dépasse pas 200 kWh par habitant si on le calcule sur la base de la production, et il descend même à 170 kWh par habitant si on le calcule sur la base de la consommation.

Après la fin de la dernière guerre, le Portugal a inauguré une nouvelle politique d'expansion de la production et de l'utilisation de l'électricité, seule forme d'énergie dont le développement puisse être de nature autarcique, car toutes les autres ne peuvent s'obtenir qu'au moyen d'importation de matières premières.

Original : anglais.

Cette politique d'expansion a pris plus d'importance encore par les effets du plan de 6 ans, 1952-1958, actuellement appliqué, et du plan prévu ensuite, où la même tendance s'accentuera certainement, car il semble que les prévisions établies sont déjà largement dépassées. De plus, les investissements et les réalisations sont en plein essor, par exemple, le développement de l'industrie des engrais et de la sidérurgie, l'électrification des chemins de fer, et surtout l'électrification rurale, qui augmenteront considérablement la consommation d'énergie.

Cependant, cela ne signifie pas qu'il y aura une diminution sensible du rythme de l'accroissement de la demande d'énergie, quoiqu'il ne faille pas compter pouvoir maintenir le pourcentage élevé des 5 dernières années. Tout considéré, il est probable que la production de 1964 atteindra une valeur de $4\ 500 \times 10^6$ kWh, ce qui correspond au taux d'accroissement actuel de 10,5 pour cent entre 1954 et 1964, puis une valeur de $10\ 000 \times 10^6$ kWh en 1974, ce qui équivaut à un accroissement annuel de 8,3 pour cent entre 1964 et 1974.

Il faut se souvenir que, malgré ces chiffres et compte tenu des pertes et du gaspillage, la consommation par habitant ne dépassera pas 470 kWh et 1 000 kWh en 1964 et 1974 respectivement, chiffres qui sont inférieurs à ceux que l'on enregistre actuellement dans un grand nombre de pays.

Dans le cadre des problèmes européens de l'énergie, il semble opportun d'envisager la possibilité d'exporter de l'énergie sous une forme ou une autre.

Il semble aussi nécessaire, pour le bien de l'économie ibérique, de conclure un arrangement entre l'Espagne et le Portugal au sujet de leur politique de l'énergie, et ceci pour toutes les formes d'énergie.

Ceci devrait provoquer par la suite un développement de la production d'énergie électrique plus considérable que celui prévu plus haut.

Les centrales électriques, y compris les centrales thermiques en exploitation, ou celles qui sont encore en construction, ont une capacité annuelle d'environ $2\ 700 \times 10^6$ kWh pour les années moyennes. Cependant, ces chiffres sont fortement diminués pendant les années de sécheresse, au moins en ce qui concerne l'énergie permanente. Ces années-là, il serait nécessaire de pouvoir avoir recours, pour une forte proportion, aux centrales thermiques auxiliaires.

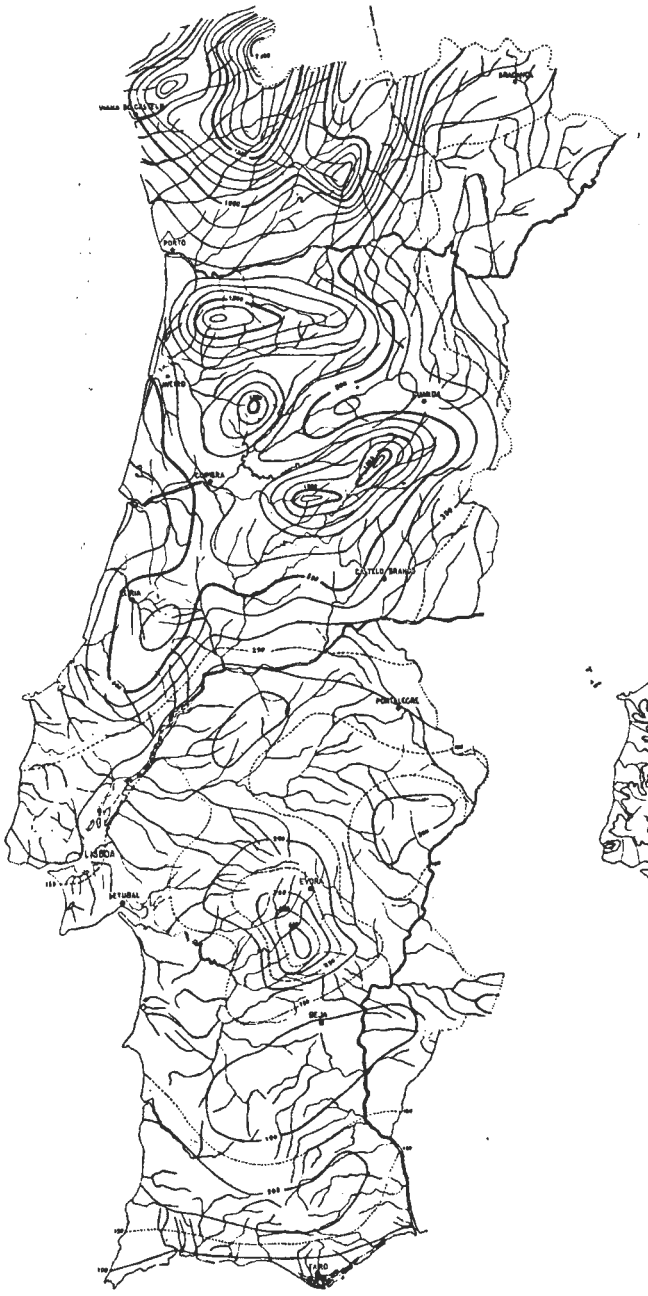


Figure 1. — Portugal métropolitain.
Étude des ressources en énergie hydroélectrique. Ruissellement ou chutes excédentaires de pluie.

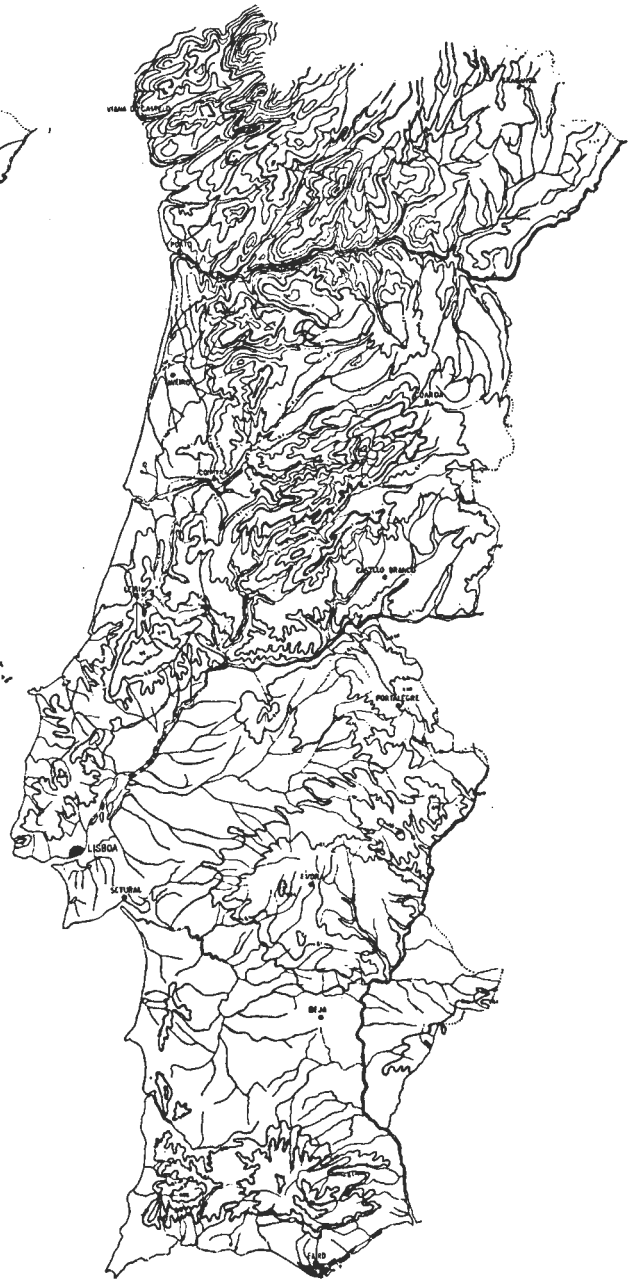


Figure 2. — Portugal métropolitain
Études des ressources en énergie hydroélectrique. Courbes isoénergétiques.

Parmi toutes les sources possibles d'énergie, les ressources portugaises d'énergie thermique sont fort rares; autrement dit, le Portugal continental ne possède pas de combustible liquide et ses ressources en combustible solide, y compris les ressources probables, sont fort réduites; elles représentent 28×10^6 tonnes de charbon et 33×10^6 tonnes de lignite, avec une production annuelle qui, dans les conditions actuelles, soit avec une utilisation minimum pour la production d'énergie, atteint 500 000 tonnes de charbon. Le charbon extrait est assez pauvre et la production nettement inférieure à la demande. Cela justifie la décision de n'employer à la production d'énergie que le charbon le plus pauvre et les résidus impropres à d'autres besoins, qu'on brûle sur le carreau de la mine ou près des mines.

Si l'on considère qu'à un rythme d'extraction croissant, la production de charbon de cette qualité pourrait atteindre 250 000 à 300 000 tonnes par an, nous ne pourrions compter en moyenne par année que sur une production d'environ 200 à 250×10^6 kWh, à partir du charbon, compte tenu de la médiocre qualité du combustible, qui a de 50 à 55 pour cent de cendres. Il faudrait faire appel pour la production des centrales thermiques à des combustibles, liquides ou solides, importés.

Il est possible au Portugal de produire de l'énergie par les marées, le vent ou le soleil, mais les difficultés que soulève l'utilisation de ces sources nous amènent à conclure que cette éventualité ne devrait être envisagée qu'après avoir complètement épuisé les autres sources d'énergie, ce qui n'arrivera que dans un avenir très lointain.

Il reste la possibilité d'obtenir de l'énergie des sources hydrauliques ou nucléaires, et la position du Portugal, à ce double point de vue, ne paraît pas défavorable.

Examinons comment il est possible d'évaluer, même indirectement, la capacité d'énergie du pays, du point de vue de la production d'origine hydraulique, sans déterminer quelle forme de production choisir, ni sous quelle forme se fera à long terme la distribution de l'énergie.

L'évaluation directe de cette capacité dépend d'une longue étude, qui devrait inclure un inventaire complet des ressources hydroélectriques du Portugal. Il existe toutefois une méthode indirecte qui permet d'effectuer cette évaluation assez exactement.

Nous connaissons les courbes pluviométriques du territoire portugais, pour la moyenne annuelle d'une période déterminée. D'autre part, nous connaissons les coefficients moyens de débit d'un certain nombre de bassins.

Sur la base des chiffres mentionnés ci-dessus, nous avons obtenu une carte de distribution des coefficients de débit sur le territoire portugais, représentés par les courbes de débit égal, ou isocoefficients.

Un usage raisonné de ces coefficients et des courbes pluviométriques a permis d'obtenir le débit utile, ou excédentaire, de chute de pluie dans les différentes régions; ces données ont été reportées sur la carte correspondante (fig. 1) — carte des débits spécifiques — afin de déterminer la répartition du ruissellement spécifique des années moyennes pour l'ensemble du territoire du Portugal continental.

D'après les cartes de pluies excédentaires et la carte hypsométrique du pays, et en admettant que 1 m^3 utilisé dans une chute totale de 500 m produise 1 kWh, ce qui correspond à un rendement de 73,5 pour cent, nous obtenons une carte des courbes isoénergétiques (fig. 2). L'unité utilisée pour exprimer la puissance, dans ce dernier graphique, est le kilowattheure par mètre carré, et il faut l'interpréter comme suit : à chaque point du pays correspond un chiffre, exprimé en kilowattheure par mètre carré et déterminé par interpolation. A supposer que chaque mètre cube de pluie excédentaire en ce point soit utilisable jusqu'au niveau de la mer, ce chiffre correspondrait à la production obtenue, pour autant que le rendement soit celui mentionné précédemment.

Certes, la quantité totale d'énergie que l'on peut produire n'est pas égale à la valeur théorique, soit du fait de l'énergie perdue entre le point de chute de la pluie et le lieu où le volume correspondant est utilisé pour la première fois, soit du fait de l'impossibilité, dans bien des cas, d'utiliser des ruissellements supérieurs et de courte durée, faute d'avoir pu régulariser le débit.

L'expérience prouve, toutefois, qu'il est possible d'utiliser de 30 à 40 pour cent de l'énergie théoriquement disponible, pour autant que les projets soient bien conçus, du point de vue technique ou économique.

La capacité théorique de production d'énergie établie sur la base des précipitations au Portugal, a été calculée à l'aide de la carte isoénergétique, en en tirant la courbe intégrale de productivité, dont la valeur s'élève à 27×10^9 kWh.

En appliquant le coefficient de rendement, on peut tirer la conclusion qu'une production annuelle moyenne atteindrait, en chiffres ronds, de 8 à $10\,000 \times 10^6$ kWh, en utilisant à fond les bassins portugais.

Il faut y ajouter l'énergie que le débit des cours d'eau provenant d'Espagne (Lima, Douro, Tage et Guadiana) peut produire sur territoire portugais.

Cette énergie, surtout celle provenant de centrales au fil de l'eau, atteint une valeur de $4\,500 \times 10^6$ kWh pour le Douro et d'environ 700×10^6 kWh pour le Tage.

Il n'est donc pas trop optimiste d'estimer les possibilités réelles de la production hydroélectrique portugaise à environ 13 à 15 $\times 10^9$ kWh, chiffres correspondant à une énergie de 145 à 165 000 kWh par kilomètre carré de territoire, ou environ 1 500 à 1 800 kWh par habitant, avec la population actuelle.

Nous ne nous sommes pas encore occupés du degré de permanence auquel sera produite l'énergie susdite. Question pourtant fondamentale pour décider quelle autre source d'énergie peut devenir nécessaire pour compenser les pénuries.

L'énergie d'origine hydroélectrique est essentiellement irrégulière, par suite des conditions climatiques du pays, au cours d'une seule année aussi bien qu'au cours d'années successives. Les graphiques joints indiquent la courbe des variations et moyennes annuelles du débit de rivières typiques et exclusivement portugaises, et aussi les variations annuelles de production de quelques-uns des principaux systèmes avec régularisation.

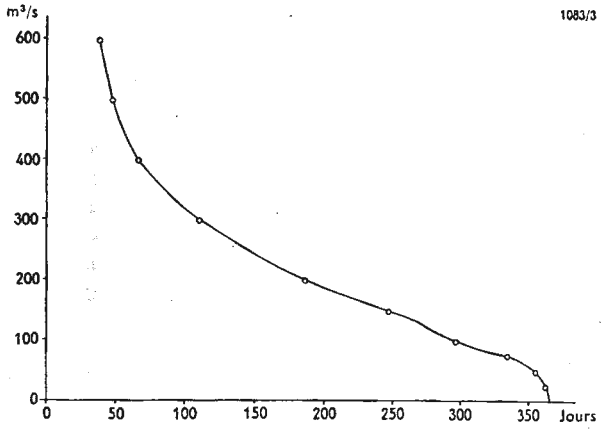


Figure 3. — Variation du débit du Douro-Picote, 1938-1953

D'autre part, les fort importantes ressources énergétiques du Douro peuvent seulement être exploitées par des centrales au fil de l'eau, et la courbe de durée, qu'on trouvera également ci-jointe (fig. 3, 4), illustre une distribution de débit classifié, exprimé en moyennes annuelles.

Cela signifie que l'utilisation des ressources énergétiques d'origine hydraulique, telles qu'elles sont indiquées, nous obligeront à user largement des centrales thermiques de compensation, soit durant l'été, soit d'une année à l'autre. Nous avons déjà signalé les sérieux inconvénients que présente cette compensation qui nous force à importer des combustibles.

Par ailleurs, les réservoirs permettant d'emmagasiner l'énergie d'une année à l'autre offrent la plus grande utilité pour régulariser le fonctionnement des centrales au fil de l'eau et c'est grâce au débit du Douro et du Tage qu'une grande quantité d'énergie peut être produite à peu de frais, même si cette production est irrégulière. On peut en conclure qu'il conviendrait, dans l'intérêt du pays, de conjuguer l'utilisation des centrales au fil de l'eau du Douro et du Tage avec des bassins d'accumulation permettant de compenser les pénuries d'une année à l'autre.

Il ressort de ces études qu'on pourrait obtenir, avec compensation partielle ou totale, et à un prix raisonnable, environ de 2 à 3 000 $\times$ 10^9 kWh d'énergie absolument permanente, à l'aide de ces centrales au fil de l'eau, complétées par des bassins de retenue d'une année à l'autre (fig. 5).

Du point de vue de l'économie du pays, il est clair que, puisqu'il est totalement contraire à l'économie du pays d'intensifier les centrales thermiques auxiliaires, il ne faudrait prendre en considération l'utilisation de centrales au fil de l'eau non compensables, ou de centrales à réservoirs de régularisation annuelle, dont l'énergie varie selon les années, que si nulle autre source d'énergie n'était disponible.

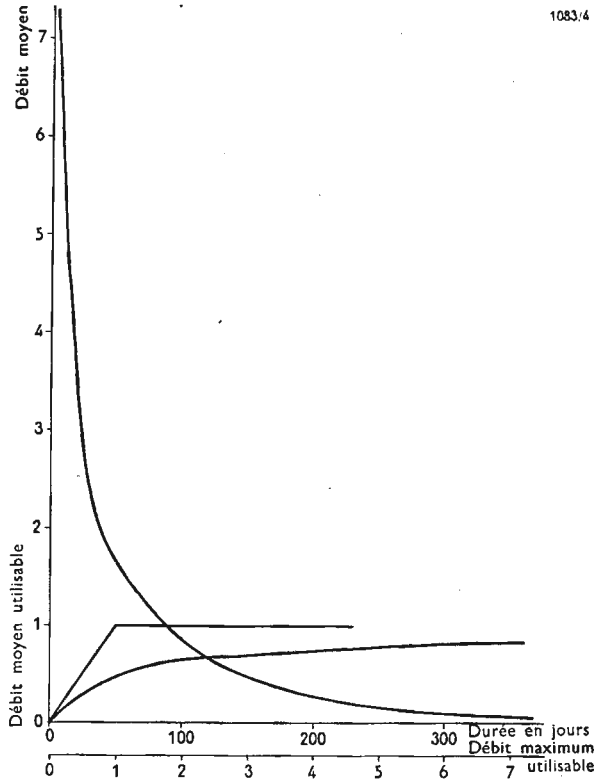


Figure 4. — Courbe de durée moyenne calculée d'après le débit moyen (durée du débit moyen : 86 jours). Caractéristique hydrologique moyenne.

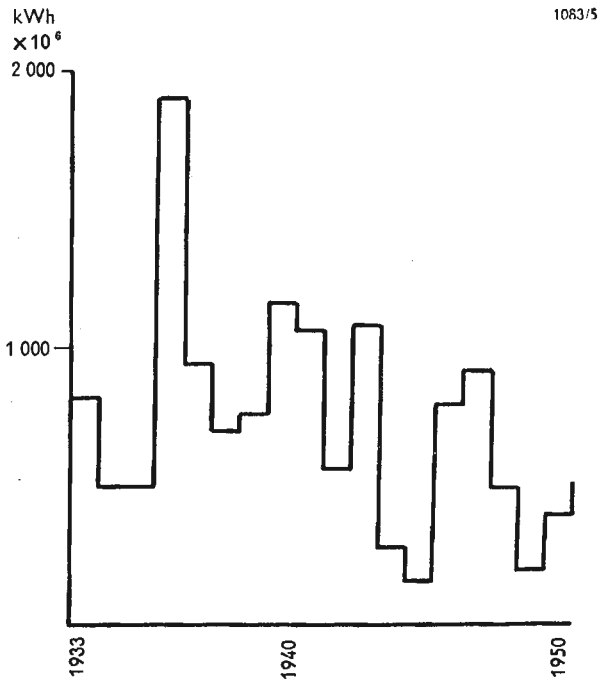


Figure 5. — Systèmes comprenant des réservoirs d'accumulation pour la régularisation annuelle.
Productibilité d'année en année, 1933-1950.

Si le choix est possible entre différentes sources d'énergie, le coût prend une importance primordiale, compte tenu de la qualité. Nous le mentionnons, parce que l'intérêt ne réside pas dans le coût de l'énergie indépendamment de la forme de production, mais dans le coût de l'énergie, compte tenu de la forme de production et de toutes les nécessités de la consommation, sans omettre les problèmes touchant les exigences de charge, c'est-à-dire la satisfaction des courbes de charge.

L'un des grands avantages de l'économie des États-Unis d'Amérique par rapport à l'économie européenne, consiste dans le fait que l'énergie, en Amérique, revient beaucoup moins cher.

Dans la situation actuelle de l'économie portugaise, un kilowattheure produit par des centrales munies de réservoirs de régularisation annuelle coûte environ de 0,20 à 0,22 escudo, pour de l'énergie qui n'est pas garantie chaque année et qui exige une compensation par les centrales thermiques pendant les années où les précipitations sont inférieures à la moyenne. Avec les frais de cette compensation, le prix moyen de l'énergie garantie à la consommation est environ 0,35 escudo — toujours aux centrales — prix relativement élevé, mais qui tient déjà compte des exigences des coefficients de charge.

Les centrales au fil de l'eau du Douro sont capables de fournir une énergie abondante, mais essentiellement irrégulière, et qui exige une forte compensation. Celles du Douro international peuvent fournir environ $2\,500 \times 10^6$ kWh en utilisant le débit maximum, pendant une durée moyenne de 100 jours par an, à un coût d'environ 0,10 escudo et en escomptant une production maximum d'énergie. Le Douro national est capable de produire environ $2\,000 \times 10^6$ kWh, dans les mêmes conditions et à un coût d'environ 0,15 escudo.

Le pays a intérêt à utiliser ces quantités d'énergie, aussi longtemps qu'il est rentable d'allier ces utilisations à d'autres, provenant de réservoirs de compensation interannuelle qui garantissent la production.

Les études déjà faites nous apprennent que cela est possible pour l'énergie produite par le Douro international, où une valeur garantie d'environ $2\,500 \times 10^6$ kWh s'obtient à un coût de 0,15 à 0,17 escudo par kilowattheure.

Pour les systèmes conjugués, à considérer en dernier lieu, le coût de l'énergie peut être supérieur, soit parce que l'énergie de compensation est plus coûteuse — Douro national —, soit parce que les conditions d'utilisation des réserves de compensation sont moins favorables, si même il est possible de les réaliser.

A ce moment, l'énergie hydroélectrique atteindrait des prix que l'on considère dès à présent comme réalisables pour l'énergie de source nucléaire.

Il est donc nécessaire d'examiner tout cela sous l'angle de la concurrence.

Le coût de l'énergie garantie, provenant de centrales avec des réservoirs de régularisation annuelle compensées par des centrales thermiques pour la régularisation d'une année sur l'autre, semble supérieur à celui qu'atteindrait l'énergie d'origine nucléaire. Encore faudrait-il lui faire assurer la charge de base, c'est-à-dire que les centrales devraient travailler avec des coefficients de charge correspondant à l'énergie installée, soit environ 0,8 à 1,0. Comme le Portugal dispose d'une certaine abondance de matière fissile, actuellement soumise à une soigneuse prospection, l'autre solution, qui consiste à utiliser l'énergie nucléaire, est à envisager dès que l'énergie permanente, provenant de centrales au fils de l'eau, et spécialement du Douro, combinées à des centrales à réservoir de compensation interannuelle, atteindra un coût comparable à celui de l'énergie de source nucléaire.

Dès lors, les centrales hydrauliques, selon l'augmentation de leur coût, devraient être étudiées par rapport aux demandes de charges, pour permettre aux centrales nucléaires de satisfaire la charge de base.

Une utilisation économique des centrales nucléaires exige des conditions de permanence, ou, en d'autres termes, un nombre élevé d'heures d'exploitation. Ce genre d'installation deviendra d'autant plus rentable que le taux d'utilisation sera plus élevé sur la courbe de charge correspondant à son fonctionnement. Cette exigence des centrales à haute puissance, comme les centrales nucléaires doivent l'être, ne pose aucun problème dans les pays où la consommation d'énergie est grande. Elle nécessite une étude attentive dans des pays encore peu développés, au point de vue de l'énergie. Ici, l'utilisation de l'énergie de source nucléaire ne peut être envisagée que lorsque ce pays atteindra une consommation d'électricité assez élevée.

Au Portugal, le coefficient de charge sur la courbe de durée de charge annuelle est approximativement de 0,57, correspondant à 5 000 heures d'utilisation de pointe, la charge minimum étant environ 0,3 du maximum et environ 0,5 de la moyenne.

Il est nécessaire, en plus de ce qui a été dit précédemment, de considérer que, l'énergie nucléaire servant à la charge de base et laissant aux autres centrales le soin d'assurer le reste de la charge quelles que soient les caractéristiques hydrologiques de l'année en question, il est indispensable de répartir dans une certaine proportion l'énergie hydraulique, thermique et nucléaire des installations, et surtout la première, selon les divers types de centrales hydrauliques. Cela implique la révision complète de la politique d'utilisation, soit quant au type d'installation à choisir, soit quant à la capacité à donner à chacune d'elles, selon les circonstances notées dans les paragraphes précédents.

Compte tenu de ce qui a été exposé et du fait que la construction et la conduite d'une centrale nucléaire impliquent certainement de nombreux et difficiles problèmes, il serait avantageux, pour se

lancer efficacement dans sa construction et son exploitation à un moment donné, d'installer le plus tôt possible une petite génératrice nucléaire pilote, de 5 000 à 10 000 kWh, afin d'acquérir l'expérience suffisante et d'instruire le personnel dirigeant, nécessaire aux futures centrales à haute puissance.

Tout bien considéré : évolution de la consommation électrique au Portugal, courbes de charge à satisfaire, possibilités d'une production rentable d'énergie absolument garantie d'origine hydraulique, rareté ou absence, dans le pays, des matières premières pour les centrales thermiques, existence de matières fissiles au Portugal, etc., nous estimons prudent de prévoir pour 1963 ou 1964 le début de l'exploitation de la première génératrice nucléaire de haute capacité. Cette date peut être avancée ou retardée, selon l'évolution de tous les facteurs énumérés, et dépendra surtout de la relation entre le coût de l'énergie produite par une telle génératrice sur une base permanente ou quasi permanente, coût qui sera probablement le plus avantageux, et celui de l'énergie permanente ou totalement garantie qui s'obtiendrait par d'autres solutions possibles, telles que centrales au fil de l'eau équipées de réservoirs d'accumulation interannuelle. Il semble bien que ce dernier coût aura de plus en plus tendance à s'accroître.

D'après ces prévisions, auxquelles on peut raisonnablement s'en tenir, le début de l'exploitation de la première centrale nucléaire à haute puissance sera conditionné par l'instruction du personnel nécessaire. Entre temps, cette instruction a déjà commencé et l'expérience indispensable s'acquerrait par l'exploitation de la centrale pilote. Au surplus, une politique prudente s'impose aussi dans la prospection et l'exploitation des matières fissiles existant en territoire portugais.

Il est évident qu'après le début de l'exploitation de la première génératrice nucléaire, il sera nécessaire de continuer à utiliser une proportion convenable d'énergie hydroélectrique. Ces centrales hydrauliques devraient, dans la mesure du possible, offrir une garantie totale de la demande, le but étant de satisfaire économiquement et pratiquement aux courbes de charges de la consommation.

La situation de l'énergie en Suède*

par Harry Brynielsson**

La Suède était considérée autrefois comme un pays riche en combustibles. Le bois à brûler fourni par ses forêts était plus que suffisant non seulement pour assurer le chauffage des maisons, mais encore pour satisfaire aux besoins des exploitations minières (qui utilisaient l'abattage au feu) et à ceux de l'industrie du fer et de l'acier; en effet, cette industrie employait le charbon de bois comme combustible et comme agent réducteur.

Mais maintenant, à une époque de consommation de combustibles fossiles, on doit considérer la Suède comme pauvre en combustibles. Le charbon, le pétrole et les gaz naturels ne font pratiquement pas partie des richesses de son sol, aussi doit-elle importer des combustibles fossiles pour la majeure partie de sa production totale d'énergie. Le bois continue à jouer un rôle économique important en tant que combustible; on l'utilise directement pour le chauffage, mais sa principale utilisation est indirecte. Il constitue la matière première de l'industrie de la cellulose et du papier, laquelle représente environ 40 pour cent des revenus d'exportation de la Suède et couvre ainsi très largement les dépenses d'importation des combustibles fossiles.

La Suède, outre le bois de chauffage, ne possède que des ressources généralement considérées comme de qualité inférieure, à savoir de la tourbe, des schistes et du charbon en petites quantités et de faible pouvoir calorifique.

En revanche, la Suède est riche en énergie hydraulique ce qui, vu le manque de combustibles fossiles, a donné lieu à une électrification considérable du pays. Dans une certaine mesure, l'énergie hydraulique a pris la place du bois de chauffage, l'énergie électrique servant à de nombreux usages thermiques pour l'économie domestique ainsi que pour certaines industries où le bois était utilisé auparavant.

La Suède possède des gisements nombreux mais faibles en teneur de ce combustible nucléaire essentiel, l'uranium; il se pourrait donc qu'à l'ère de l'énergie nucléaire, la Suède soit de nouveau considérée comme un pays abondamment pourvu en combustibles précieux. L'intense électrification de ce pays sera sans doute d'une grande utilité quand cette nouvelle source d'énergie y sera introduite.

En 1954, la consommation totale de combustible en Suède représentait l'équivalent de 20 millions de tonnes de charbon environ, et la production d'énergie électrique atteignait 23 700 millions de kilowattheures, dont 22 400 millions provenaient de l'énergie hydraulique. Le tableau 1 indique la répartition des différentes sources d'énergie.

La dernière colonne indique l'augmentation ou la diminution annuelle pendant la période de 1949 à 1953. Toutefois, de nombreux facteurs influent sur ces chiffres et ils ne peuvent, tels quels, servir de base à aucun pronostic. L'augmentation annuelle de la consommation d'électricité est actuellement de 6,5 pour cent environ. Il est plus difficile de donner des chiffres en ce qui concerne la tendance de la consommation totale de combustibles, mais il semble que le taux d'augmentation de celle-ci soit légèrement inférieur.

IMPORTATION DE CHARBON, DE COKE ET DE PÉTROLE

Comme l'indique le tableau 1, les importations de charbon, de coke et de pétrole représentent environ 70 pour cent de l'énergie consommée. Le charbon et le coke proviennent surtout de l'Allemagne occidentale, de la Grande-Bretagne, de la Pologne, et le pétrole des pays du golfe Persique. Le charbon a longtemps fait l'objet de la demande la plus importante, mais la consommation de pétrole ayant subi une augmentation plus rapide, celui-ci est le principal combustible actuellement importé. L'augmentation la plus forte concerne les huiles lourdes, mais l'accroissement du nombre des automobiles influe également sur la situation. Comme le marché international des combustibles est très sensible aux crises politiques, des situations difficiles peuvent fréquemment se présenter, ainsi que l'a prouvé l'expérience. Aussi est-il très important de pouvoir stocker d'abondantes réserves de combustible. La concurrence sur le marché des combustibles fossiles pourrait, à la longue, devenir plus sérieuse, amenant des hausses et une pénurie de combustible. La perspective d'une telle situation ainsi que l'accroissement de la consommation obligent la Suède à étudier de très près les possibilités d'exploiter le plus possible ses propres ressources de combustibles.

Original : anglais.

* Les statistiques qui figurent dans cet exposé ont été communiquées par le Comité des combustibles de 1951.

** Directeur-administrateur de la Compagnie suédoise de l'énergie atomique, Stockholm, Suède.

Tableau 1

Répartition des différentes sources d'énergie dans le bilan énergétique de la Suède

	Quantité (1954) (première évaluation)	Moyenne pour la période de 1949 à 1953		
		Quantité	Pourcentage	Taux annuel d'accroissement ou de diminution (en pour cent)
Importation				
Charbon	3 640 × 10^3 tonnes	4 523 × 10^3 tonnes	22,6	— 1
Coke	2 800 × 10^3 »	2 566 × 10^3 »	13,9	+ 7
Pétrole	6 280 × 10^3 »	4 317 × 10^3 »	33,4	+ 15
			69,9	+ 8
Production				
Charbon	295 × 10^3 »	307 × 10^3 »	1,1	0
Tourbe	110 × 10^3 »	100 × 10^3 »	0,3	+ 8
Bois à brûler	7 × 10^6 m^3	12,1 × 10^6 m^3	14,9	— 9
Charbon de bois	0,5 × 10^6 »	1,1 × 10^6 »	0,8	— 12
Pétrole et combustibles liquides	150 × 10^3 tonnes	124 × 10^3 tonnes	0,9	+ 7
Énergie hydraulique	22,4 × 10^9 kWh	18 × 10^9 kWh	12,1 [a]	+ 8
			30,1	— 1
TOTAL			100,0	+ 5

[a] On emploie dans cette colonne le facteur d'équivalence théorique : 1 kWh = 860 kcal. Dans une centrale à vapeur, il faut une livre de charbon par kWh, ce qui correspond à 3 200 kcal environ.

GISEMENTS DE CHARBON

Les gisements de charbon, d'ailleurs peu importants, sont cantonnés dans la province de Scanie; les filons houilliers sont minces et le pouvoir calorifique du charbon est faible. La production annuelle est d'environ 300 000 tonnes; au cours de la dernière guerre elle a atteint un maximum d'environ 500 000 tonnes.

TOURBE

Il existe en Suède de nombreuses tourbières, et l'on estime que la quantité totale de tourbe atteint 6 000 millions de tonnes, ce qui équivaut approximativement à 3 000 millions de tonnes de charbon. Cependant, un grand nombre de ces tourbières sont difficilement exploitables à l'échelon industriel, étant donné leur forme et leur faible étendue. Aussi estime-t-on que la quantité de tourbe récupérable aujourd'hui pour l'économie du pays est limitée à 400 millions de tonnes, ce qui équivaut environ à 200 millions de tonnes de charbon. Toutefois, on recense actuellement toutes les tourbières pouvant être mises en valeur, et il est possible que les chiffres qui viennent d'être cités soient dépassés, surtout si les techniques d'exploitation sont améliorées.

Différents moyens sont utilisés pour extraire la tourbe; l'un consiste à découper des mottes de tourbe, dont le pouvoir calorifique est d'environ 300 kcal/kg, l'autre à broyer la tourbe. Cette dernière méthode, mieux adaptée à la production industrielle, permet d'obtenir de la tourbe en poudre, ayant un pouvoir calorifique d'environ 2 000 kcal/kg, qui peut ultérieurement être mise sous forme de briquettes fournissant à peu près 4 000 kcal/kg. Des expériences sont également entreprises dans une usine témoin, en vue d'appliquer le procédé de carbonisation par voie humide pour l'utilisation de la tourbe.

Les travaux de recherche relatifs à la tourbe sont effectués par un organisme gouvernemental, la Compagnie suédoise pour l'exploitation de la tourbe, qui dirige une installation fonctionnant depuis 1940 à Sösdala. On y produit actuellement environ 110 000 tonnes de tourbe combustible par an, revenant approximativement à 1,5 öre par mégacalorie (0,003 dollar par mégacalorie). Durant la dernière guerre mondiale, la production maximum de tourbe a été de 1,2 million de tonnes par an.

La tourbe est considérée en Suède comme un succédané non négligeable, en particulier durant les périodes où le charbon et les autres combustibles sont difficiles ou impossibles à obtenir. Les travaux de recherche et d'exploitation en cours sont effectués en vue de réduire l'importation des autres combustibles, tout en assurant à la tourbe un débouché permanent.

BOIS

Le bois, comme nous l'avons dit plus haut, a un rôle de moins en moins important en tant que combustible, ce qu'indique bien le tableau 2.

Tableau 2

Production de bois à brûler et de bois pour la fabrication du charbon de bois

Année	Production de bois à brûler (en m³)	Production de bois pour le charbon de bois (en m³)
1901	10 × 10^6 [a]	4,5 × 10^6
1938	8 × 10^6	2 × 10^6
1955 (chiffres approximatifs) .	5,5 × 10^6	0,5 × 10^6

[a] Mesuré en tant que bois plein

Actuellement, le bois à brûler sert surtout au chauffage des maisons dans les régions rurales et, dans une moindre mesure, à l'industrie. Sur un total d'environ 40 millions de mètres cubes de bois coupé, 15 pour cent seulement sont utilisés comme combustible. Aujourd'hui, le bois sert principalement de matière première aux scieries et à l'industrie de la cellulose et du papier qui sont d'une importance capitale dans l'économie du pays. Durant les périodes de blocus, le bois constitue cependant une réserve très précieuse de combustible, d'autant plus qu'au cours de telles périodes, les possibilités d'exportation des industries précitées sont évidemment limitées. Ainsi, de 1939 à 1948, la production de bois à brûler a atteint un maximum d'environ 27 millions de mètres cubes par an.

Au cours de la seconde guerre mondiale, la plupart des automobiles en Suède marchaient au gazogène, en utilisant du charbon de bois ou des copeaux. La production d'alcool pour moteur à partir des lessives de sulfites a également joué un rôle important.

Une des principales difficultés qui se présente, lorsqu'on utilise en grand le bois comme combustible, c'est qu'il exige beaucoup de manutention. Afin de remédier à cet inconvénient, on a monté un certain nombre d'installations qui sont alimentées en copeaux de bois et en combustible au moyen de foyers mécaniques, et on a obtenu de bons résultats. Il serait important de rechercher des moyens efficaces pour utiliser le combustible que représentent les branches d'arbre, les troncs de diamètre réduit et les déchets de scieries.

SCHISTES

Le tableau 3 donne quelques renseignements sur les plus importants gîtes de schiste alunifère de Suède. Les premières tentatives pour produire du pétrole à partir des schistes avaient commencé dès la fin du XIX^e siècle, et, après la première guerre mondiale, ces efforts furent repris sur une échelle industrielle, mais ils durent être abandonnés pour des raisons économiques. En 1932, l'État a repris à son compte une des usines situées à Kinne-Kleva; en 1941, un organisme d'État, la Compagnie suédoise des schistes et pétroles, a été créé, surtout en vue d'assurer pendant les hostilités la fourniture des produits pétroliers les plus indispensables. L'usine était située à Kvarntorp, dans la province de Närke, région où les gisements de schiste sont relativement riches en pétrole et peuvent être exploités à ciel ouvert. Avec les méthodes actuelles, on ne peut récupérer qu'une partie du soufre, ce qui est d'une grande conséquence économique. Une partie du soufre disparaît en fumée sous forme de SO_2 et c'est là l'obstacle principal à l'accroissement de la production.

Le pétrole est obtenu par pyrolyse du schiste en vase clos; on emploie également une autre méthode de pyrolyse *in situ* au moyen de chauffage par des résistances électriques. Cette production représente de 1 à 2 pour cent de la consommation totale de pétrole dans ce pays. On a évalué que les prix obtenus par une production accrue seraient équivalents à ceux du marché mondial.

Tableau 3

Gîtes de schistes alunifères

Province	Quantité (en milliards de tonnes)	Teneur en pétrole (pour cent)	Pétrole en équivalent de millions de tonnes de charbon	Pouvoir calorifique total en équivalent de millions de tonnes de charbon	Teneur en soufre (pour cent)	Teneur en uranium (gramme par tonne)
Scanie	10	0	0	10 000 (?)	2,5- 6,0	< 100 (?)
Öland	3	2,8	130	550	3,0-10,0	< 100 (?)
Östergötland .	5	3,8	310	1 300	3,0- 9,0	< 100 (?)
Närke	1,7	5,0	130	560	6,0- 7,0	100-200
Västergötland .	3	1,7	75	700	6,0- 7,0	200-300

Des recherches sont actuellement entreprises en vue d'utiliser le schiste comme combustible dans des centrales et d'en faire la matière première pour la production de gaz combustible. Il semble que ce soit là l'unique moyen d'exploiter certains gîtes tels que ceux de la province de Scanie, qui consistent surtout en coke provenant de la décomposition plutonienne des schistes.

ÉNERGIE HYDRAULIQUE

L'ensemble de l'énergie hydraulique dont on peut économiquement tirer parti représente, estime-t-on, 80 000 millions de kWh par an, dont à peu près le tiers est exploité aujourd'hui. Vu l'augmentation actuelle de la consommation, l'énergie hydraulique sera exploitée en totalité dans une génération (voir fig. 1). Sur la production totale d'électricité de 1954, soit approximativement 23 700 millions de kWh, environ 1 300 millions de kWh seulement ont été produits dans des centrales à vapeur. L'énergie hydraulique représente donc environ 95 pour cent de la production totale d'énergie électrique. La capacité installée des centrales hydrauliques atteignait, à la fin de 1954, 4 569 MW. Les chemins de fer, actuellement électrifiés sur 85 pour cent environ de leur parcours, ont consommé quelque 1 400 millions de kWh.

Le nord de la Suède possède à peu près 80 pour cent de la puissance hydraulique, tandis que c'est le centre et le sud du pays qui consomment environ 80 pour cent de l'énergie produite. Aussi le problème que pose le transport de l'énergie est-il d'une extrême importance, et c'est pourquoi l'Office national de l'énergie a, pour la première fois au monde, construit des lignes de transmission à 380 kV. On étudie la possibilité d'utiliser des tensions encore plus élevées ainsi d'ailleurs que de hautes tensions continues.

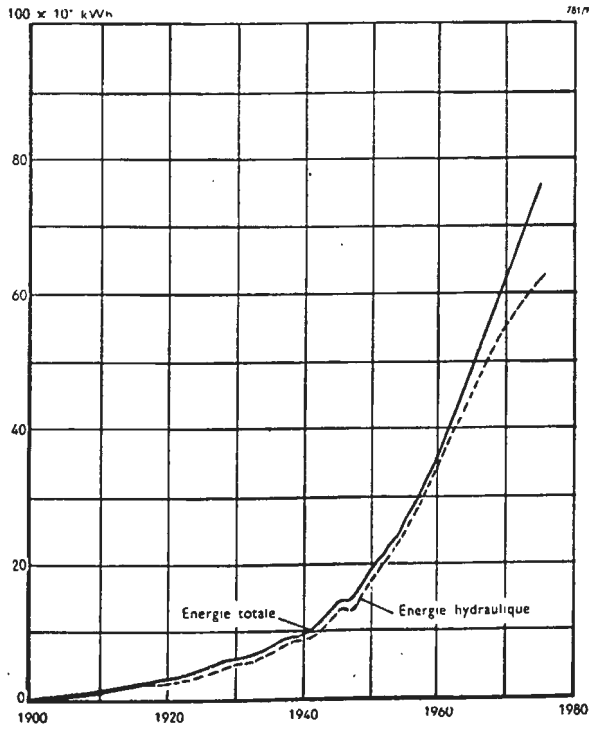


Figure 1. — Production d'électricité.

On a calculé que le prix de l'énergie produite dans les nouvelles centrales hydrauliques est de 1,5 à 2 öre par kWh (0,003 à 0,004 dollar par kWh); du fait que la distance moyenne entre ces centrales et les centres de consommation les plus importants est d'environ 800 km, le prix final à la distribution est de 2,5 à 4 öre par kWh (0,005 à 0,008 dollar par kWh).

ÉNERGIE ATOMIQUE

Comme l'indique le tableau 3, la teneur en uranium de certains schistes va de 100 à 300 grammes par tonne. On a calculé que la quantité d'uranium à extraire de ces schistes pourrait atteindre plusieurs centaines de milliers de tonnes. Ces schistes représentent donc une matière première abondante, quoique de faible teneur, pour la production de l'uranium, et constituent la plus importante réserve d'énergie connue en Suède. On ne connaît pas actuellement l'existence d'autres gisements de minerai d'uranium ou de thorium; toutefois, des travaux de prospection sont en cours [1]*.

La Compagnie suédoise de l'énergie atomique [2], compagnie gérée à la fois par le Gouvernement et l'industrie privée, a mis au point des méthodes d'extraction de l'uranium, dont la production à l'échelle industrielle a commencé en 1953 à Kvarntorp [3]. Cette localité a été choisie en raison de ses gisements de schistes qui, comme on l'a dit, étant à ciel ouvert, sont facilement exploitables, et aussi parce que certains moyens dont dispose la Compagnie suédoise des schistes et pétroles peuvent y être utilisés. Le prix de revient de l'uranium obtenu à partir de ces minerais de faible teneur sera bien entendu relativement élevé, mais on ne pense pas qu'il doive être prohibitif s'il s'agit de produire de l'énergie.

Jusqu'à présent, la Suède n'a pas entrepris la production de substances pouvant servir comme modérateurs ou pouvant être employées dans une pile pour des applications spéciales, telles que le béryllium ou le zirconium; ces questions font toutefois l'objet d'une étude suivie. La Compagnie suédoise de l'énergie atomique fait fonctionner, depuis l'été 1954 [4] une pile expérimentale de 300 kW, utilisant de l'uranium naturel et de l'eau lourde, et prévoit d'ici 3 à 4 ans la mise en service d'une seconde pile d'étude, de quelques dizaines de milliers de kilowatts, destinée à l'essai des matériaux ainsi qu'à une production limitée de plutonium. Les milieux gouvernementaux et industriels s'inté-

* Les numéros entre crochets renvoient à la bibliographie qui figure à la fin du mémoire.

ressent de plus en plus aux génératrices nucléaires, et il est probable que, d'ici dix ans au plus tard, fonctionnera la première génératrice de ce genre.

On fonde les plus grands espoirs sur la contribution future de l'énergie nucléaire à la production de l'énergie et en particulier de l'énergie électrique. On étudie déjà sérieusement les possibilités d'utiliser cette nouvelle source d'énergie pour le chauffage domestique qui représente actuellement le tiers de la consommation totale d'énergie, ainsi que pour la production de charbon à des fins industrielles.

CONCLUSIONS

En Suède, de même que dans un grand nombre de pays industriels, la demande d'énergie augmente rapidement. De nos jours, la consommation d'électricité double tous les dix ans, alors que celle des combustibles subit une augmentation légèrement inférieure. 70 pour cent environ de l'énergie totale sont fournis par les combustibles fossiles importés et on remarque surtout à ce sujet que le pétrole tend à remplacer graduellement le charbon. Un programme d'électrification toujours plus poussé, faisant appel à l'énergie hydraulique et à l'énergie nucléaire, la part toujours plus grande accordée à l'exploitation de ressources indigènes telles que les schistes, la tourbe et, dans une moindre mesure, le bois, permettront de restreindre l'importation de combustibles fossiles. Ces mesures peuvent avoir une importance particulière lorsque les prix du charbon et du pétrole viendront à augmenter et que ces produits seront difficiles à obtenir.

95 pour cent de l'électricité sont fournis par l'énergie hydraulique; on pense exploiter cette énergie encore durant une génération, période au cours de laquelle l'énergie atomique fera progressivement son apparition. On s'efforcera également d'utiliser cette source d'énergie pour différents genres de chauffage, tels que le chauffage domestique qui, en l'occurrence, est d'une importance particulière, vu le climat de la Suède.

Améliorer en vue de la production de l'uranium les méthodes de traitement des gisements de matières premières abondants mais de faible teneur en uranium, former des savants et des ingénieurs spécialistes de la physique atomique, capables de construire et d'exploiter des génératrices nucléaires, tels sont les points principaux envisagés dans le programme suédois d'énergie atomique. Ajoutons que, dans ce domaine, une large coopération internationale sera extrêmement profitable.

BIBLIOGRAPHIE

1. Svenke E., *Les ressources de la Suède en uranium et en thorium.* Voir mémoire P/782, Actes de la présente Conférence, vol. VI, séance 6 B.
2. Brynielsson H., *La Société suédoise de l'énergie atomique, un exemple de collaboration entre le Gouvernement et l'industrie privée.* Voir mémoire P/783, Actes de la présente Conférence, vol. XIII, séance 4.3.
3. Svenke E., *Traitement des schistes alumineux uranifères.* Voir mémoire P/784, Actes de la présente Conférence, vol. VIII, séance 14 B.
4. Eklund S., *The Swedish Reactor*, J. Nuclear Energy, 1954, vol. 1: 93-100.

Besoins et ressources de la Suisse en énergie électrique et thermique

BESOINS

Le Comité de l'énergie du Comité national suisse de la Conférence mondiale de l'énergie a effectué des études très approfondies sur l'évolution jusqu'à nos jours de la consommation d'énergie en Suisse *. Ces études ont permis d'établir le tableau 1 concernant le développement de la consommation d'énergie utile, en kilowattheures et par habitant, sous ses diverses formes d'utilisation :

Tableau 1

Consommation d'énergie utile

(En kilowattheures par habitant)

	1910	1930	1939	1951
Chaleur . . .	2 715	4 114	4 559	5 206
Travail mécanique . . .	207	411	459	758
Lumière . . .	23	78	86	117
Chimie	104	203	258	365
TOTAL . . .	3 049	4 806	5 362	6 446

Il ressort du tableau 1 que les besoins en chaleur sont déterminants quant aux besoins d'énergie utile; en 1910, ils atteignirent les 89 pour cent et, en 1951, ils représentaient encore les 81 pour cent de ces derniers. La série de chiffres ci-dessus, qui ne tient pas compte des périodes anormales (première guerre mondiale, dépression consécutive à celle-ci, crise économique 1931-1936, deuxième guerre mondiale), montre que l'évolution des besoins *globaux* en énergie utile a été jusqu'à maintenant linéaire.

Admettons pour l'estimation demandée des besoins en énergie jusqu'à l'an 2000 — sans grande théorie et en supposant que des changements radicaux ne se produiront ni dans la technique industrielle, ni dans les prix de revient, que l'évolution linéaire actuelle continue. Nous obtiendrons alors, en supposant un développement futur analogue et en tenant compte d'une augmentation de la population semblable à celle observée de 1910 à 1951, les chiffres indiqués au tableau 2 concernant les besoins passés et futurs en énergie utile.

Tableau 2

Besoins passés et futurs en énergie utile

Année	Besoins en énergie utile par habitant (en kWh)	Nombre d'habitants (en millions)	Besoins totaux en énergie utile (en milliards de kWh)
1910	3 049	3,75	11,4
1930	4 806	4,07	19,5
1939	5 362	4,21	22,6
1951	6 446	4,71	30,3
1975 (environ)	8 400	5,30	44,5
2000 (environ)	10 500	6,00	63,0

COUVERTURE DES BESOINS

Pour couvrir ses besoins en énergie, la Suisse ne dispose, comme agents énergétiques indigènes, que du bois de feu et de l'électricité d'origine hydraulique. Les sondages effectués en vue de découvrir du pétrole et des gaz naturels ont été jusqu'à maintenant infructueux. Les combustibles pour la fission nucléaire manquent également. La production du bois de feu restera à l'avenir de l'ordre de grandeur actuel. En revanche, la production d'électricité d'origine hydraulique augmentera considérablement. Pour autant que la construction d'usines hydroélectriques continue après 1960 au rythme actuel (1950 à 1960) — ce qui, sauf grands changements d'ordre économique, est probable — toutes nos forces hydrauliques économiquement utilisables le seront effectivement entre 1975 et 1980. Leur capacité de production en année moyenne est estimée à 30 milliards de kilowattheures en chiffres ronds au départ des usines.

CONCLUSIONS

Compte tenu des suppositions faites — et sans oublier les aléas que comportent tous les pronostics, notamment lorsqu'ils concernent un avenir si éloigné — la Suisse serait donc en mesure de couvrir en majeure partie l'augmentation de ses besoins en énergie utile jusque vers 1975-80, par l'aménagement intégral de ses forces hydrauliques. En revanche, pour l'augmentation ultérieure de ses besoins, elle serait obligée d'avoir recours exclusivement à l'importation d'agents énergétiques étrangers (char-

* Tiré à part du *Bulletin Technique de la Suisse Romande*, nº 9, du 8 mai 1954.

bon, huiles de chauffage, benzine et éventuellement gaz naturel, énergie atomique). Comme les besoins en énergie pour l'éclairage, le trafic ferroviaire et les moteurs fixes pourront être couverts, en l'an 2000 comme aujourd'hui, entièrement par de l'électricité d'origine hydraulique, ces agents seront utilisés uniquement pour la production de chaleur, la traction des véhicules et la chimie.

Les besoins en énergie pour l'année 2000 obtenus dans le tableau 3, soit 100 milliards de kilowattheures pour l'énergie brute, dont 65 milliards de kilowattheures devant être importés, ne sont valables que pour autant qu'aucun agent énergétique étranger ne soit utilisé pour la production d'énergie électrique, c'est-à-dire que la consommation de l'électricité se limite à la production des usines hydroélectriques. Si au contraire, ces agents devaient en partie servir à la production d'électricité, les besoins en énergie brute et en énergie importée seraient plus élevés en proportion, étant donné le rendement plus faible des machines thermiques. Alors qu'une telle évolution, basée sur l'emploi des agents énergétiques traditionnels, comme le charbon et l'huile, paraît peu indiquée du point de vue de l'économie énergétique, comme aussi pour d'autres raisons, l'apparition d'usines électriques utilisant l'énergie nucléaire pourrait précisément être la condition déterminante d'une augmentation de la part de l'électricité dans la couverture des besoins en énergie de notre pays après 1975-1980.

Tableau 3

Aperçu sur les besoins en énergie utile et brute ainsi que sur leur couverture par des agents énergétiques indigènes et importés

(En milliards de kilowattheures)

	1930	1951	1975	2000
Besoins en énergie utile	19,5	30,3	44,5	63,0
Facteur de transformation	(0,51)	(0,57)	(0,6)	(0,63)
Besoins en énergie brute	38,3	53,0	74,0	100,0
Sources indigènes d'énergie :				
Bois	5,3	5,3	5,0	5,0
Forces hydrauliques	4,2	11,5	27,0	30,0
Importations d'agents énergétiques	28,8	36,2	42,0	65,0

Besoins et ressources de la Thaïlande en énergie électrique et thermique

par M. Boonrod Binson*

La Thaïlande occupe un territoire de 513 000 km² environ sur la péninsule indochinoise de l'Asie du Sud-Est, entre le 6e et le 20e degré de latitude nord et le 97e et le 106e degré de longitude est. Le pays est bordé au nord par les États du Laos et les États Chan, à l'ouest par la Birmanie inférieure et le golfe du Bengale, au sud par le territoire de la Fédération de Malaisie et le golfe de Thaïlande, et à l'est par le Laos et le Cambodge.

On peut diviser le pays en cinq régions physiographiques principales. Ce sont :

1. Les hautes terres du Nord-Ouest, composées de plusieurs chaînes de montagnes s'étendant du nord au sud, sur toute la longueur du pays.

2. La plaine de Chao Phya, grande plaine alluvionnaire en forme de delta, dont la base se trouve sur le golfe de Thaïlande, et la pointe à 400 km au nord.

3. Le vaste plateau de Korat, qui s'étend dans la partie nord-est du pays, flanqué à l'ouest et au sud par des chaînes de montagnes.

4. La région de Chanthaburi, qui comprend au nord et au centre un plateau bien découpé et au sud et à l'ouest une plaine côtière.

5. La région péninsulaire, qui comprend à la fois plaine et montagne, à l'extrémité méridionale de la plaine de Chao Phya.

La Thaïlande comptait 19 100 000 habitants en 1952. Compte tenu du taux d'accroissement annuel de 2 pour cent, on évalue la population actuelle à 20 300 000 habitants (hommes : 51 pour cent, femmes : 49 pour cent).

BESOINS GÉNÉRAUX

La Thaïlande a besoin d'isotopes radioactifs pour des applications cliniques. Si les recherches relatives aux isotopes radioactifs et leur application en médecine ont été poussées très loin aux États-Unis d'Amérique et dans un grand nombre de pays européens, elles l'ont été fort peu en Asie. Un certain nombre de docteurs thaïs ont suivi aux États-Unis d'Amérique des cours de formation sur l'emploi des isotopes radioactifs. Nombreux sont les malades qui pourraient bénéficier de ce genre de soins et il est certain que les besoins augmenteront de plus en plus dans l'avenir. La Thaïlande ne doit pas hésiter à généraliser l'emploi des isotopes radioactifs dans le pays, tout particulièrement à des fins médicales.

Les habitants de la Thaïlande se consacrent à l'agriculture sous une forme ou sous une autre, dans la proportion de 85 pour cent. Les revenus agricoles représentent environ 60 pour cent du revenu national total. On voit donc le rôle important que les isotopes radioactifs pourront jouer pour la recherche agricole. Mais pour que la Thaïlande puisse utiliser ce nouvel instrument de recherche en vue d'améliorer sa production, il faut qu'elle obtienne une aide technique et le matériel nécessaire à l'application des isotopes radioactifs à la recherche agricole.

Afin d'améliorer et d'étendre l'enseignement de la science nucléaire et pour introduire l'enseignement de l'application industrielle de cette science dans les principales universités thaïlandaises, la Thaïlande a besoin d'une assistance technique que les Nations Unies pourraient lui accorder sous la forme suivante : envoi d'experts en Thaïlande; fourniture de manuels, d'instruments et d'équipement; octroi de bourses à des nationaux thaïlandais pour l'étude à l'étranger de la physique nucléaire et de ses applications industrielles.

L'énergie nucléaire destinée à fournir l'énergie électrique et thermique nécessaires au développement industriel et agricole du pays pourra trouver en outre une application assez importante dans la partie nord-est du pays, le plateau de Korat.

BESOINS EN ÉNERGIE

Si l'on entend par industrie la production de biens de consommation durables et de biens de consommation non durables ainsi que le traitement des produits agricoles, on peut dire que l'industrie la plus développée en Thaïlande est actuellement le traitement des produits agricoles et forestiers, riz et bois. La production des biens de consommation n'occupe que la seconde place dans le développement industriel du pays. Ces biens sont, dans une

---

Original : anglais.

* Direction nationale de l'énergie, Bangkok, Thaïlande.

large mesure, produits par de petites industries pour la consommation domestique.

La production d'énergie électrique destinée à répondre à la demande de l'industrie et du commerce ainsi qu'aux besoins domestiques, est à présent concentrée autour de Bangkok, capitale du pays. Cette production est encore tout à fait insuffisante; elle ne peut s'accroître au même rythme que la demande, qui est passée de 20 MW en 1942 à 100 MW en 1954. Les centrales électriques de Bangkok sont dotées de turbines à vapeur, tandis que les centrales de province sont pourvues de turbines diesel.

C'est à Bangkok que l'énergie électrique coûte le moins cher : 65 stangs le kWh pour les premiers 50 kWh et 100 stangs ensuite pour tout le reste de la consommation. Pour les centrales rurales, les tarifs varient de 150 à 350 stangs par kWh. Le stang vaut à peu près 0,05 cent des États-Unis d'Amérique.

Il est donc évident, étant donné ces tarifs, que la Thaïlande n'a pas seulement besoin d'énergie électrique, mais encore d'énergie à bon marché. L'expérience montre que, dans d'autres pays aussi, l'énergie est demeurée pendant longtemps une marchandise précieuse. Tout porte donc à croire que si, dans l'avenir, la Thaïlande dispose elle aussi d'énergie à bon compte, elle ne différera en rien des autres pays qui ont réussi à fournir cette force indispensable dans des conditions avantageuses.

La Thaïlande, étant un pays tropical, n'a pas besoin de chauffage dans les habitations, sauf pendant l'hiver et dans la région la plus septentrionale. L'énergie électrique, au contraire, est indispensable pour la réfrigération et la climatisation. Les besoins thermiques pour la cuisine domestique et pour certains traitements industriels peuvent être évalués en terme d'énergie électrique.

D'après les statistiques établies par la Direction nationale de l'énergie en Thaïlande, la consommation totale d'énergie et de chaleur dans l'ensemble du pays a été en 1954 de 97 294 kW. Ce chiffre ne tient pas compte des besoins thermiques pour la cuisine domestique, auxquels le charbon de bois peut suffire. Sur cette consommation totale, Bangkok figure pour 75 pour cent et le reste du pays pour 25 pour cent.

On estime que tant que l'énergie sera peu abondante et coûteuse, la demande annuelle n'augmentera que de 7,5 pour cent. Mais à partir de 1960, la première installation hydroélectrique importante de la Thaïlande, celle de Yanhee dans les hautes terres du nord-ouest, à 440 km de Bangkok, pourra mettre à la disposition du public 360 000 kW d'énergie à bas prix qui contribueront à favoriser le développement industriel du pays. On estime que l'augmentation annuelle de la demande passera vraisemblablement à 15 pour cent en 1961 et 1962, et à 12 pour cent en 1963, 1964 et 1965, ce qui portera à 278 950 kW la demande totale d'énergie et de chaleur nécessaires au développement industriel en 1965, c'est-à-dire dans 10 ans.

On prévoit que l'augmentation annuelle sera de 10 pour cent pendant les dix ans qui s'écouleront de 1966 à 1975, la demande totale s'élevant en 1975 à 723 267 kW. De 1976 à 1985, cette augmentation annuelle sera de 8 pour cent et de 1986 à 1995 de 7 pour cent, de sorte que, dans quarante ans, la demande totale s'élèvera à 3 071 667 kW. On trouvera au tableau 1 le détail des augmentations annuelles prévues pour la période 1954-1995.

Tableau 1

Évaluation des besoins d'énergie pour le développement industriel

Année	Kilowatts	Pourcentage d'augmentation sur l'année précédente
1954	97 294 [a]	
1955	104 591	7,5
1956	112 385	7,5
1957	120 814	7,5
1958	129 875	7,5
1959	139 616	7,5
1960	150 087	7,5
1961	172 600 [b]	15
1962	198 482	15
1963	222 300	12
1964	248 970	12
1965	278 850	12
1966	306 735	10
1967	337 409	10
1968	371 150	10
1969	408 265	10
1970	449 092	10
1971	494 001	10
1972	543 401	10
1973	597 741	10
1974	657 515	10
1975	723 267	10
1976	781 128	8
1977	843 618	8
1978	911 107	8
1979	983 996	8
1980	1 062 716	8
1981	1 147 733	8
1982	1 239 552	8
1983	1 338 710	8
1984	1 445 813	8
1985	1 561 478	8
1986	1 670 782	7
1987	1 787 737	7
1988	1 912 879	7
1989	2 046 781	7
1990	2 190 056	7
1991	2 343 360	7
1992	2 507 395	7
1993	2 682 913	7
1994	2 870 717	7
1995	3 071 667	7

[a] Statistique de la Direction nationale de l'énergie.
[b] Apparition sur le marché de l'énergie produite à prix réduit par la centrale de Yanhee.

SOURCES CLASSIQUES D'ÉNERGIE

Autrefois, en Thaïlande, le charbon de bois, le bois de chauffage et la balle de riz constituaient les trois combustibles qui fournissaient l'énergie thermique. Le charbon de bois était utilisé exclusivement pour la cuisine domestique. Il l'est encore. Le bois de chauffage et la balle de riz servent surtout à produire de la vapeur, soit directement par l'industrie, soit comme source indirecte d'énergie grâce à l'électricité. L'industrie s'étant développée en même temps que le pays et la population, la balle de riz, qui n'existe qu'en quantité limitée, a perdu toute son importance en tant que source d'énergie. Le bois de chauffage représente toujours une source d'énergie considérable, mais les abattages ont pris de telles proportions que l'exploitation des forêts pour la fourniture de bois de chauffage a dû être limitée, et que l'on a fait appel à d'autres sources d'énergie.

Cette situation a poussé le gouvernement à rechercher les ressources existantes en charbon, en pétrole et en énergie hydraulique. En 1952, le département des mines du Ministère de l'industrie, avec l'aide technique et financière de la Foreign Operations Administration des États-Unis d'Amérique, a commencé à rechercher dans différentes régions les gisements de lignite. Les plus importants (14 millions de tonnes métriques) ont été découverts dans les hautes terres du nord-ouest, à Mae Moh, et dans la péninsule à Krabi (4 millions de tonnes métriques) et à Kiansa (20 000 tonnes métriques). Le total des réserves connues de lignite est donc de 20 millions de tonnes métriques avec une valeur thermique moyenne de 2 268 000 calories (9 000 Btu par livre). Le lignite est extrait à Mae Moh et un plan d'utilisation a été établi par la Direction nationale de l'énergie.

Le Département des mines a également fait procéder à la prospection du pétrole dans l'ensemble du pays. On n'en a trouvé qu'à l'extrême pointe septentrionale des hautes terres du Nord-Ouest, à Fang. On estime à 22 millions de barrels les réserves découvertes. On procède en ce moment à l'installation d'une raffinerie pour la production d'essence, de mazout et de sous-produits du pétrole brut. L'huile de schiste existerait en petites quantités dans la partie méridionale des hautes terres du Nord-Ouest, près de la frontière birmane, mais cette information devra être confirmée par des prospections qui restent à faire.

Les ressources d'énergie hydroélectrique de la Thaïlande sont de deux genres. Pour les unes, ce sont les fleuves principaux, pour les autres les chutes des affluents de ces fleuves. La plus importante source d'énergie du premier type est Yanhee, sur le fleuve Mae Ping, dans la partie centrale des hautes terres du Nord-Ouest. Cette source de force hydroélectrique est capable de produire 360 000 kW de puissance assurée et une centrale y est en construction. A la fin de 1960, elle pourrait fournir de l'énergie à 29 provinces dans la plaine de Chao Phya, y compris Bangkok.

On trouvera au tableau 2 l'énumération des sources d'énergie hydroélectrique du même type, avec leur emplacement et leur capacité.

Tableau 2

Ressources hydroélectriques des principaux fleuves

Nom et emplacement	Puissance en kW (puissance assurée)
Sur le Mae Ping à Yanhee	360 000
Sur le Mae Nan à U-Luang	80 000
Sur le Mae Kok à Wang Song	40 000
Sur le Mae Jam à Ob-Luang	40 000
Sur le Mae Tang à Gerd	40 000
Sur le Quay Yai à Kang Rieng	40 000
Sur le Quay Yai à Ongka	40 000
Sur le Pasak à Pa Sa-ang	20 000
Sur le Pejaburi à Takein Ha Bat	6 000
Sur le Quay Yai à Klong Ngou	4 000
Sur le Mae Kan à Pa Toub.	4 000
TOTAL	674 000

Les chutes de Karome, près de Sonkla, dans la péninsule, représentent la source la plus considérable d'énergie du second type. La capacité des chutes est de 10 000 kW. Un plan d'exploitation de ces chutes a été établi. On trouvera au tableau 3 les emplacements et la capacité de ce type de source d'énergie hydroélectrique en Thaïlande.

Tableau 3

Ressources hydroélectriques des chutes d'eau

Nom et emplacement	Puissance en kW (puissance de pointe)
Karome près Songkla	10 000
Tone Nga Chang près Songkla	10 000
Promalok près Nakorn Srithamaraj	5 000
Huey Kaew, Chiengmai	3 000
Boripat près Songka	2 500
Bajo près Narativat	1 200
Krachong près Trang	1 000
Huey Sai Kao près Pattani	1 000
Huey Luang près Prachuob Kirikan	300
Deux emplacements dans l'Ile Samui	600
TOTAL	34 600

Il existe en outre environ 50 rivières qui, avec leurs affluents, devront faire l'objet d'une évaluation destinée à établir leur capacité de production. Mais dans l'ensemble, les ressources hydroélectriques totales du pays ne dépasseront pas 1 million de kilowatts. Ce chiffre ne comprend pas les ressources

que représente le Mékong, fleuve international capable de produire plus de 1 million de kilowatts s'il est convenablement exploité.

DEMANDE ET RESSOURCES

Lorsqu'en 1961 la centrale de Yanhee mettra sur le marché sa production d'énergie électrique, tous les besoins de la Thaïlande en force et en chaleur seront couverts par cette source classique d'énergie. Cette situation durera jusqu'en 1970, date à partir de laquelle d'autres projets du même genre devront être mis en œuvre si l'on ne veut pas que l'offre devienne insuffisante.

Mais en 1980, même si toutes les installations hydroélectriques sont terminées et toutes les ressources en pétrole et en lignite exploitées, la Thaïlande aura de nouveau à faire face à une pénurie d'énergie, à moins que le projet d'exploitation du Mékong ne soit réalisé. En utilisant à plein cette ressource, l'équilibre entre l'offre et la demande sera maintenu jusqu'en 1990, après quoi la demande recommencera à dépasser l'offre.

Dans ces conditions, on peut conclure qu'il faut que toutes les sources classiques d'énergie de la Thaïlande soient exploitées à plein dans un délai de 25 ans, et, si l'on y comprend l'exploitation du Mékong, dans un délai de 35 ans. Il est peu vraisemblable qu'il en soit ainsi dans un pays tel que la Thaïlande où les recensements et les travaux de cartographie aérienne des bassins fluviaux sont encore tout récents. L'écart doit donc être rempli par l'énergie atomique. On estime que les quantités nécessaires pour répondre à ces besoins seront de 300 000 kW d'énergie atomique entre 1971 et 1980, et de 500 000 kW entre 1981 et 1990, et s'accentueront encore par la suite.

L'énergie atomique ne servira pas seulement à combler l'écart entre l'offre et la demande; elle facilitera considérablement le développement de certaines régions de la Thaïlande qui ne disposent d'aucune source conventionnelle d'énergie, ou dont l'éloignement des sources d'énergie gêne le développement économique. L'une de ces régions est le plateau de Korat.

ÉNERGIE ATOMIQUE DESTINÉE AU DÉVELOPPEMENT D'UNE RÉGION PARTICULIÈRE

Il y a lieu de mentionner ici que toutes les sources de force électrique de la Thaïlande, que leur origine soit le lignite, le pétrole ou les chutes d'eau, sont situées principalement, on l'a vu, soit dans les hautes terres du Nord-Ouest, soit dans la péninsule. La plaine de Chao Phya (Plaine basse du Ménam) possède cependant les ressources hydrauliques de Pasak, et le centre de cette région n'est pas à plus de 200 km du barrage de Yanhee. Le problème de la pénurie de sources classiques d'énergie ne se pose donc pas. La région de Chanthaburi est de petite étendue et possède plusieurs sources de force hydroélectriques importantes qui restent à explorer. Mais les conditions sont très différentes sur le plateau de Korat.

Cette région est un plateau en forme d'assiette, incliné vers le sud-est, et dont l'étendue couvre à peu près le tiers du pays tout entier. Elle est bornée au nord et à l'est par le Mékong, à l'ouest par les ondulations de la plaine de Tchao Phya, et au sud par les montagnes de la région du Chanthaboum. Le plateau tire son nom de la ville de Korat (dont le nom officiel est Nakorn Rajasima), qui est la plus importante de la région.

L'altitude du plateau à l'ouest et au nord, est de 130 à 200 mètres au-dessus du niveau de la mer. Oubon, situé à l'extrémité sud-est du plateau, n'est plus qu'à 50 mètres.

Le plateau de Korat est essentiellement une région formée par érosion. Sa structure ne présente qu'un faible relief, car l'usure des intempéries en a fait une plaine presque unie.

La région de plaine proprement dite n'est pas véritablement de formation alluvionnaire. On y rencontre seulement quelques étendues marécageuses où l'on cultive le riz. L'inondation, durant la saison des pluies, recouvre une partie de la plaine. Pendant la saison sèche, la région souffre de manque d'eau. Le sol cultivable est presque partout plus profond et pauvre.

Pendant la saison humide, la moyenne des pluies est d'environ 1 100 millimètres et elle atteint 1 450 millimètres pour l'année entière. Le riz exigeant environ 1 800 millimètres d'eau pour parvenir à maturité et la fréquence, la durée et la quantité des pluies variant considérablement au cours de la saison de culture, la production du riz est souvent déficitaire, et l'eau fait défaut pour les besoins domestiques. Il est donc tout à fait évident qu'un système d'irrigation soigneusement organisé est indispensable.

Il est prouvé cependant que la retenue de l'ensemble des eaux provenant de tous les cours d'eau de cette région ne suffirait pas à satisfaire aux besoins de cette irrigation. La topographie de la région, avec ses ondulations de petites chaînes de collines séparant les cours d'eau, n'offre guère de site propice à la création de réserves suffisamment importantes.

Le développement futur des plans d'irrigation dépendra donc, soit de l'utilisation des eaux du Mékong, qui borde la région au nord et à l'est, soit des ressources d'eau souterraines s'il en existe en quantités suffisantes, ou encore de l'une et de l'autre.

L'utilisation des eaux du Mékong requerra de l'énergie électrique pour pomper l'eau du fleuve dans les principaux canaux d'irrigation. La masse d'eau nécessaire pour répondre aux besoins est évaluée à 1 000 m^3 par seconde et le fonctionnement des pompes exigera 100 000 kW. Les ressources en

eau souterraine ne sont pas encore connues et, si elles sont suffisantes, mais sans pression, il faudra, là encore, des quantités considérables d'énergie pour les amener à la surface.

En ce qui concerne le Mékong, il offre sans peine un volume d'eau suffisant. Son écoulement annuel atteint au moins 500 000 millions de m^3, et son débit moyen est d'environ 15 900 m^3 par seconde. Le rapport maximum-minimum de son débit est de 35,3 et le rapport moyen-minimum de 9.

La difficulté consiste donc à trouver l'énergie nécessaire pour actionner les pompes, le centre de la région se trouvant éloigné de 1 000 km de toutes les sources classiques d'énergie situées dans les hautes terres du Nord-Ouest ainsi que des centres de production d'énergie électrique de la plaine du Mé-Nam. Si l'on pouvait construire une pile atomique de 100 000 kW, qui fournirait la puissance thermique à des machines à vapeur, elles-mêmes destinées à actionner des génératrices électriques placées sur la rive du Mékong pour y pomper l'eau, ou à faire tourner les moteurs des stations de pompage des eaux souterraines, cette contrée — aujourd'hui l'une des plus stériles — pourrait devenir l'une des régions agricoles les plus riches du pays.

On estime aussi que la création d'un système de production d'énergie électronucléaire, capable de fournir de la puissance à bon marché, favoriserait en même temps le développement industriel de cette région. Il est évident que le coût initial de la pile atomique serait élevé, mais la Thaïlande ayant besoin de mener à bien des recherches et des expériences dans le domaine de cette nouvelle source d'énergie et de cette nouvelle science, cette dépense initiale pourrait être assumée en partie par les projets d'éducation et de recherches, et en partie par les projets d'irrigation et d'énergie.

Besoins du Royaume-Uni en énergie

par G. H. Daniel *

Au mois de février 1955, le Gouvernement de Sa Majesté a publié un programme commercial provisoire de construction de centrales électronucléaires [1] **. Les deux premières doivent entrer en service en 1960-1961 et, en 1965, il en existerait 12, représentant une puissance installée totale d'environ 1 500 à 2 000 MW et assurant une économie de charbon de 5 à 6 millions de tonnes par an. L'expérience acquise, et les quantités de plutonium produites, permettraient alors un développement beaucoup plus considérable. Des prévisions à aussi longue échéance restent évidemment incertaines, mais on pense que, dans les premières années qui suivront 1970, il devrait être possible de développer la construction de nouvelles installations dans une proportion suffisante pour faire face à l'accroissement des besoins de l'industrie en énergie électrique, qui devrait alors approcher, pense-t-on, de 3 000 MW par an. Les coûts relatifs des centrales alimentées au charbon et des centrales électronucléaires devraient permettre d'assurer grâce à ces dernières le développement de la production de courant. En 1975, la puissance installée totale des génératrices nucléaires en Grande-Bretagne pourrait ainsi être de l'ordre de 10 000 à 15 000 MW. Ces centrales seront utilisées pour la charge de base et l'économie de charbon réalisée équivaudrait à environ 40 millions de tonnes par an.

Ce programme, dont la réalisation supposera l'investissement de capitaux considérables (plus de 300 millions de livres sterling au cours des dix prochaines années), constitue un tournant décisif dans le développement industriel du pays. Comment l'examen de la situation en ce qui concerne les combustibles et l'énergie le justifie-t-il? Voyons tout d'abord de quelle manière a évolué la consommation de combustibles et d'énergie au Royaume-Uni, et passons ensuite à l'examen des ressources de combustibles classiques disponibles pour alimenter cette consommation.

CONSOMMATION TOTALE DE COMBUSTIBLES PRIMAIRES

L'histoire de la demande de combustibles se confond pour une bonne part avec celle du développement économique du pays et, dans ses premières phases, avec l'histoire des débuts de la révolution industrielle qui a commencé il y a environ deux cents ans. Dès avant cette époque, un poète anglais déplorait :

« Les ravages et la dévastation
qu'en un temps aussi bref que celui de mes jours,
subissent partout dans cette île,
bois et bocages, orgueil de ce Royaume. »

(*George Withers*, 1634.)

Mais le combustible le plus courant était alors le bois; et, bien que l'extraction du charbon fût pratiquée depuis plusieurs siècles, il ne servait qu'au chauffage domestique. C'est à partir de 1750 environ que furent réalisés des progrès spectaculaires; les inventions de quelques hommes, dont les noms sont célèbres dans le monde entier, permirent alors d'utiliser de manière économique la grande réserve de force contenue dans le charbon pour la production d'énergie mécanique, et pour le traitement du fer. Au cours des cent années suivantes, la population de l'Angleterre et du Pays de Galles passa d'un peu plus de 6 millions à près de 18 millions d'habitants, tandis que la production annuelle de charbon, qui était inférieure à 5 millions de tonnes par an, atteignait environ 60 millions de tonnes. A une économie agricole, exportant surtout des matières premières, succéda une économie industrielle, exportatrice des produits manufacturés.

Certains aspects caractéristiques des premiers stades de ce développement se retrouvent de façon constante dans toute l'expansion de la consommation de combustibles et valent d'être notés. Le développement de l'industrie du charbon ne fut pas une simple conséquence du développement des autres industries et de leur demande accrue d'énergie; en fait, l'industrie du charbon contribua beaucoup elle-même à stimuler l'expansion industrielle. Ce fut, par exemple, la nécessité d'évacuer l'eau des mines qui incita Savory et Newcomen à inventer leur machine à vapeur; les transports de charbon ont, pour une bonne part, provoqué le percement des canaux et la construction de voies ferrées, et la possibilité d'employer le charbon pour des usages tels que la réduction par évaporation de l'eau salée, a donné naissance à l'industrie chimique. Nous pouvons voir l'énergie d'origine nucléaire commencer à jouer un rôle analogue dans la Grande-Bretagne d'aujourd'hui.

Original : anglais.

* Ministry of Fuel and Power, Londres.

** Les numéros entre crochets renvoient à la bibliographie qui figure à la fin du mémoire.

Consommation intérieure de combustibles primaires au Royaume-Uni

	En millions de tonnes d'équivalent de charbon				Population (en millions)	Consommation totale par habitant (en tonnes)
	Charbon	Pétrole	Énergie hydraulique	Total		
1913 . . .	190,6	3,9	—	194,5	42,5	4,6
1924 . . .	185,3	9,2	0,1	194,6	44,9	4,3
1937 . . .	188,9	18,3	0,6	207,8	47,3	4,4
1946 . . .	186,2	19,1	0,8	206,1	49,2	4,2
1954 . . .	213,5	42,1	1,3	256,9	50,8	5,1

Notes :

1. Contrairement à ceux de la figure 1, ces chiffres ne comprennent pas les livraisons de soutes.
2. Une tonne de charbon est considérée comme équivalant à 0,5 tonne de pétrole. Les chiffres relatifs à l'énergie hydraulique correspondent à la quantité de charbon nécessaire pour produire la même quantité de courant dans une centrale thermique. Actuellement, une tonne de charbon produit environ 1 800 kWh.

Un autre enseignement qui se dégage des débuts de la révolution industrielle est formulé dans la citation suivante de Jevons [2] : « C'est une méprise complète de penser que l'emploi des combustibles dans des conditions économiques équivaut à une réduction de leur consommation. » Le rendement des combustibles fit, dans les premières années, des progrès extraordinaires : par exemple, la quantité de charbon nécessaire pour produire une énergie mécanique de 1 ch/h passa d'environ 30 livres à environ 6 livres au cours des cent années qui vont de 1750 à 1850, et celle que nécessite la fabrication d'une tonne de fonte fut ramenée de plus de 7 tonnes

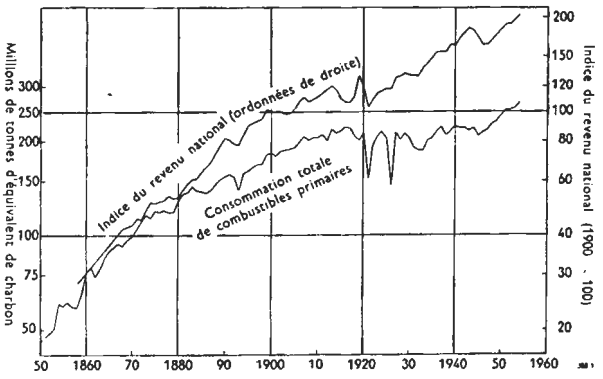


Figure 1. — Consommation totale de combustibles primaires au Royaume-Uni et indice du revenu national aux prix constants.

N. B. — Les combustibles primaires comprennent le charbon et le pétrole destinés à la consommation intérieure et aux soutes, ainsi que l'énergie hydroélectrique; une tonne de charbon est considérée comme équivalant à 0,5 tonne de pétrole et au nombre d'unités d'électricité qu'elle produirait dans une centrale thermique (habituellement 1 800 unités environ). Le revenu national est calculé selon les prix de 1900 et établi à partir des sources suivantes : 1850-1870 : Colin Clark, *The Conditions of Economic Progress*, 1951; 1870-1945 : Prest A. R., *National Income of the United Kingdom*, The Economic Journal, mars 1948, vol. 58, Part 229; 1946-1954 : *National Income and Expenditure Blue Books*, 1946-1953, et *Livre blanc*, 1954.

à environ 2 tonnes. Mais ces économies ne firent que rendre plus avantageux l'emploi du moteur à vapeur et du fer, et la demande de combustibles en reçut une nouvelle impulsion.

Au milieu du siècle dernier, le taux moyen composé d'accroissement de la production de charbon était de près de 4 pour cent par an. Plus de la moitié de la quantité totale de charbon extraite dans le monde provenait alors de Grande-Bretagne. La figure 1 montre l'évolution de la consommation de combustibles primaires (charbon, pétrole et énergie hydroélectrique) au cours des cent années qui suivirent, en même temps qu'une estimation du revenu national. L'impression générale qui se dégage de cette figure est que la consommation s'est accrue à une cadence rapide au début de la période considérée, puis a connu avant la première guerre mondiale une augmentation plus lente, pour osciller enfin, jusqu'à ces dernières années, aux environs d'un niveau relativement stable. Certains observateurs en ont conclu à tort que le développement de la consommation de combustibles en Grande-Bretagne aurait atteint son plafond; ils en donnaient pour raison la maturité de l'économie britannique, et la tendance qu'aurait l'expansion, une fois atteint un certain niveau d'industrialisation, à se manifester surtout dans le secteur des industries légères qui produisent des biens de consommation et des services. L'examen des causes qui ont freiné l'accroissement de la consommation totale de 1913 à 1946, ainsi que le changement radical constaté au cours des dernières années, montrent que cette interprétation est erronée, et qu'il serait dangereux de s'y attacher pour établir les plans d'approvisionnement en combustibles et en énergie.

Outre l'influence exercée par deux guerres mondiales, la réduction de la vente pour les soutes de navires a été l'une des raisons importantes pour lesquelles l'accroissement de la consommation de combustibles entre 1913 et 1946 est resté au faible niveau indiqué dans la figure 1 : le tonnage de charbon livré

aux soutes est passé de 21 millions de tonnes par an à moins de 5 millions de tonnes, tandis que les livraisons de pétrole aux navires augmentaient d'un peu plus de 1,5 million de tonnes. Le ralentissement de l'expansion de l'industrie lourde a également contribué, dans l'entre-deux-guerres, à freiner l'accroissement de la consommation d'énergie. Le développement le plus rapide fut enregistré dans la construction mécanique, qui n'emploie que relativement peu de combustible, mais dont la production a une grande valeur et exerce une forte influence sur l'indice de la production; par contre, la fabrication de fonte et de produits chimiques ne progressait que lentement. Comme troisième facteur important, nous mentionnerons l'amélioration particulièrement rapide du rendement des combustibles, certaines industries ayant atteint un stade de développement technique propice à cette amélioration. De 1924 à 1937, la consommation moyenne de coke, par tonne de fonte, est descendue de 26 cwt * à 22 cwt, et le tonnage de charbon brûlé dans les usines à gaz n'a augmenté que de 8 pour cent pour une production accrue de 20 pour cent. Enfin, et c'est là le fait le plus remarquable, la consommation moyenne de combustible par kilowatt d'électricité produit a été ramenée de 2,5 livres** à 1,5 livre; aux sérieuses économies de combustibles faites par les centrales se sont ajoutées celles réalisées par l'industrie, qui s'occupait alors activement de remplacer ses propres sources d'énergie, d'un rendement insuffisant, par l'énergie à bon marché fournie par les services publics. On ne peut pas s'attendre que cette cadence rapide de l'amélioration du rendement se maintienne indéfiniment.

Depuis 1946, l'accroissement de la consommation intérieure de combustibles primaires a été en moyenne de 2,8 pour cent par an; ce taux est du même ordre de grandeur que ceux enregistrés dans la seconde moitié du siècle dernier, et il n'y a aucune raison valable de prévoir un ralentissement sensible dans les années à venir. Le taux élevé actuel provient pour une part du développement rapide de l'activité industrielle dans son ensemble, et en partie aussi du rôle important joué par l'industrie sidérurgique, l'industrie chimique, le raffinage de pétrole et les autres secteurs de l'industrie lourde, y compris l'équipement atomique. En outre, si de sérieuses améliorations continuent d'être apportées au rendement des combustibles, dans certains secteurs, elles ne sont pas aussi importantes qu'aux stades antérieurs, où sur le plan technique s'offraient de plus grandes possibilités d'amélioration. L'expérience, aussi bien que le sens commun, montrent qu'il est hasardeux, et pour tout dire déraisonnable, de faire pour de longues périodes des projections extrapolées de courbes où interviennent plusieurs variables; néanmoins, une augmentation annuelle de 2 pour cent en moyenne de la demande de combustibles primaires au cours des dix ou vingt prochaines années semble assez vraisemblable. Si tel est le cas, la demande passera, en équivalent de charbon, de 257 millions de tonnes en 1954 à près de 390 millions de tonnes en 1975.

* 1 cwt (hundredweight) = 50,802 kg.

** 1 livre anglaise = 433, 6 g.

LA DEMANDE D'ÉLECTRICITÉ

La consommation de charbon des centrales électriques est passée de 8 millions de tonnes en 1924 à 40 millions en 1954, ce qui représente un accroissement supérieur à celui de la consommation totale intérieure pour tous usages pendant la même période. Ce fait montre avec quel dynamisme s'est développée l'industrie électrique, en même temps qu'il donne une idée des effets que des centrales électronucléaires pourraient exercer sur la demande de combustibles primaires classiques.

Jusqu'où se poursuivra encore l'augmentation de la demande d'électricité? Il suffit de considérer un instant les principales catégories de consommateurs pour se rendre compte que cette augmentation sera probablement rapide pendant longtemps encore. L'industrie, par exemple, achète 32 milliards de kilowattheures par an, et en produit elle-même environ 10 milliards. Pourtant, la consommation totale par personne employée est encore bien inférieure à celle que l'on constate dans d'autres pays industriels, et devra être développée si l'on veut améliorer la productivité et réduire les coûts de fabrication. D'autre part, la modernisation de l'industrie charbonnière suppose l'électrification complète des charbonnages, où sont encore en service des moteurs à propulsion mécanique représentant une puissance totale de plus de 2 millions de chevaux-vapeur. Il y a également beaucoup d'intérêt, au point de vue économique, à augmenter les fournitures de courant aux exploitations agricoles, où les avantages que présente l'emploi de l'électricité pour actionner les moteurs des installations de séchage, d'éclairage et d'autres appareils sont bien établis. La British Transport Commission a récemment publié les plans qu'elle a établis en vue de combler, essentiellement par l'électrification, le retard important du développement des chemins de fer [3]. Pour ce qui est de la consommation domestique, les chiffres ci-après concernant les dépenses des ménages montrent bien qu'il existe un rapport étroit entre l'emploi de l'électricité et le niveau de vie :

Revenu hebdomadaire des ménages (en livres sterling)	Estimation des dépenses [4] en 1948-1949			
	Pour l'électricité		Pour tous les autres combustibles	
	Livres sterling	Shillings	Livres sterling	Shillings
Inférieur à 3	2	2	12	10
De 3 à 5	3	11	14	3
De 5 à 10	6	2	16	8
De 10 à 20	8	6	19	2
20 et plus	16	5	19	3

Lorsqu'on passe des revenus faibles aux revenus élevés, les dépenses consacrées à l'électricité augmentent beaucoup plus vite que celles consacrées aux autres combustibles. Les familles disposant en 1948-1949 d'un revenu hebdomadaire d'environ 20 livres sterling ne dépensaient pas beaucoup plus pour les autres combustibles que les familles ayant un revenu de 10 à 20 livres sterling, mais elles consacraient près du double aux dépenses d'électricité. Actuellement, il se consomme en Grande-Bretagne, pour des usages purement domestiques, environ 20 milliards de kilowattheures, soit à peu près 370 kWh par personne pour l'ensemble de la population. Ce chiffre est sans doute très élevé par rapport aux chiffres correspondants de bien des pays; pourtant, avec l'accroissement des revenus, on peut penser que la consommation domestique continuera à augmenter rapidement, doublant tous les douze ans environ.

Le remplacement des autres combustibles, et aussi du travail de l'homme, par l'électricité, présente de si grands avantages que l'accroissement de la consommation de courant a été rapide, et dans une grande mesure indépendante des variations de l'activité industrielle. Le prix moyen de l'électricité était en 1954 inférieur d'un cinquième à celui de 1913, tandis que le prix du pétrole avait plus que doublé, celui du gaz de ville plus que triplé, et celui du charbon plus que quintuplé. Même comme moyen de chauffage domestique, ce qui est une de ses utilisations les moins avantageuses, compte tenu de sa souplesse d'emploi et de l'économie de travail qu'elle permet, l'électricité n'est maintenant guère plus onéreuse que les combustibles solides, en dépit de la perte thermique entraînée par la transformation de chaleur en énergie, ensuite utilisée pour le chauffage. La figure 2 montre l'augmentation du coût de la main-d'œuvre non qualifiée par rapport à celle du prix de l'électricité*. En 1905, le coût d'une heure de travail de manœuvre permettait d'acheter environ 2 kWh d'électricité; en 1954, ce dernier chiffre était passé à environ 30 kWh. Bien que l'on ne pense pas que le prix relatif de l'électricité baisse au cours des cinquante années à venir aussi vite que depuis un demi-siècle, la position déjà redoutable occupée sur le marché par l'électricité par rapport aux autres formes d'énergie ira sans doute se renforçant, au fur et à mesure que s'amélioreront le rendement des centrales et les coefficients de charge, et que le prix des combustibles primaires (qui n'entre que pour un tiers dans le prix du courant facturé aux usagers) poursuivra sa hausse.

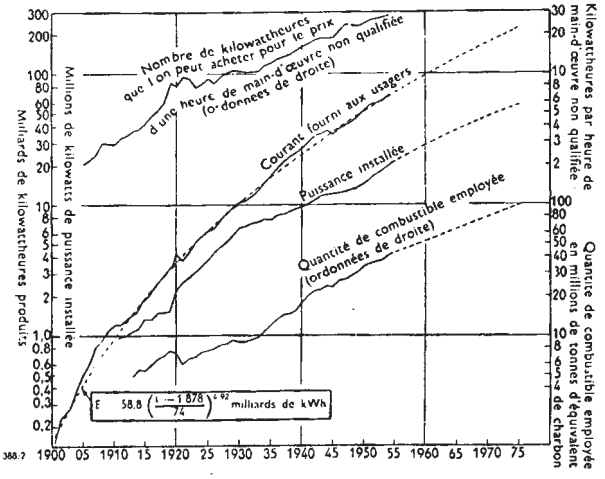


Figure 2. — Évolution à long terme en Grande-Bretagne des fournitures de courant aux usagers, de la puissance installée et des quantités de combustible employées, ainsi que du prix de la main-d'œuvre non qualifiée par rapport à celui de l'électricité.

N. B. — Cette figure a été établie en divisant le salaire horaire moyen de la main-d'œuvre non qualifiée pour chaque année par le prix moyen d'un kilowattheure d'électricité.

La figure 2 indique aussi l'évolution de la consommation d'électricité au cours des cinquante-cinq dernières années, et la prolonge jusqu'en 1975, indiquant aussi les projections correspondantes pour la puissance installée et la quantité de combustible nécessaire aux centrales. En 1975, on prévoit que l'équivalent de charbon du combustible nécessaire représentera environ 100 millions de tonnes par an, soit plus d'un quart de la quantité totale de combustibles primaires consommés dans le pays. La puissance installée (non compris les centrales hydrauliques et les usines de pompage) serait de 55 000 mégawatts, et celle des usines qui entrent en service est voisine de 3 000 mégawatts par an.

RESSOURCES EN COMBUSTIBLES

La houille, dont l'abondance et le prix peu élevé ont constitué la base du développement de l'industrie moderne, est la seule source d'énergie que l'on trouve en abondance en Grande-Bretagne. Les ressources hydrauliques sont faibles; les forces aménagées représentent une économie de l'ordre de 1 million de tonnes du charbon utilisé chaque année par les centrales thermiques, et les réserves, y compris la capacité de production de l'estuaire de la Severn, ne permettraient encore d'économiser que 7 millions de tonnes par an [5]. Les gisements connus de pétrole, de gaz naturel et de schistes pétrolifères sont négligeables.

Nombre d'industries britanniques ont vu le jour à des endroits comme Wednesbury, dans le South Staffordshire, « où la couche de charbon n'étant recouverte que d'une mince épaisseur de terre, les ouvriers enlèvent cette terre, recueillent le charbon sous leurs pieds et l'emportent dans des brouettes sans qu'il y ait besoin de treuil, de cordage ou de benne [6] ». Toutefois, on comprit rapidement qu'il n'en serait pas toujours ainsi, et que bientôt l'extraction du charbon présenterait de grandes difficultés. Dans le discours qu'il prononça en 1863

* On a obtenu ce graphique en divisant le salaire horaire moyen de la main-d'œuvre non qualifiée (travailleurs du bâtiment) pour chaque année par le prix moyen du kilowattheure d'électricité.

à l'Association britannique pour l'avancement de la science, Sir William Armstrong disait : « Si nous considérons la cadence à laquelle nous faisons appel aux veines produisant le combustible de meilleure qualité et exploitables aux moindres frais, nous en ressentons de vives inquiétudes. La grandeur de l'Angleterre repose pour une bonne part sur le fait que son charbon est, par son prix peu élevé et sa qualité, supérieur à celui des autres nations; mais nous avons déjà extrait de nos mines les plus précieuses une quantité de charbon qui excède de beaucoup celle qui a été produite dans toutes les autres parties du monde réunies, et le moment n'est pas loin où il nous faudra affronter ces inconvénients : l'accroissement des frais d'exploitation et la baisse de la valeur de la production. »

Sir William avait raison. Le charbon le plus accessible étant extrait, il fallut que les mines s'enfoncent davantage sous terre, en même temps que l'attention se portait sur les veines moins épaisses. La profondeur moyenne des mines atteignait environ 1 000 pieds (330 mètres) en 1914; elle est aujourd'hui de 1 300 pieds (400 mètres) environ, et tous les nouveaux charbonnages dont l'exploitation a été autorisée depuis le début de 1947 ont des profondeurs allant de 1 800 à 3 000 pieds (600 à 1 000 mètres). En même temps que la profondeur, la température et les difficultés de ventilation s'accroissent. L'effritement de la mine augmente, ce qui rend plus difficiles l'entretien des galeries et l'extraction du charbon. Les meilleures veines, comme le « Top Hard » dans l'est des Midlands, le gisement « Barnsley » dans le Yorkshire et la « Black Vein » dans le Monmouthshire, sont dans une grande mesure épuisées, et nous devons maintenant nous rabattre sur des veines négligées par les générations précédentes. Les tâches de l'industrie minière deviennent ainsi toujours plus difficiles. De plus, en dépit de l'aide qu'apporte un emploi beaucoup plus considérable de l'énergie, mécanique et électrique, et des explosifs, en dépit également d'une véritable révolution dans les normes de sécurité, le charbon s'obtient toujours au prix d'un dur effort musculaire, et dans des conditions de travail beaucoup plus pénibles que celles qui règnent dans la plupart des autres industries; il faut constamment améliorer les salaires et les conditions de travail pour empêcher les mineurs de partir, et les feuilles de paie entrent toujours pour les deux tiers dans les frais de production. Les figures 3 et 4 montrent l'action de ces facteurs. La production par année d'ouvrier a atteint au cours du siècle dernier une pointe qu'il n'a pas été possible de dépasser depuis lors, les augmentations du rendement par travailleur ayant été compensées par la réduction du temps de travail que les mineurs sont disposés à fournir. Par ailleurs, il est frappant de constater la remarquable régularité de l'accroissement composé de 1,2 pour cent par an (soit un doublement tous les soixante ans) enregistré dans le prix du charbon par rapport à l'ensemble des prix de gros.

Les problèmes qui se posent à l'industrie minière

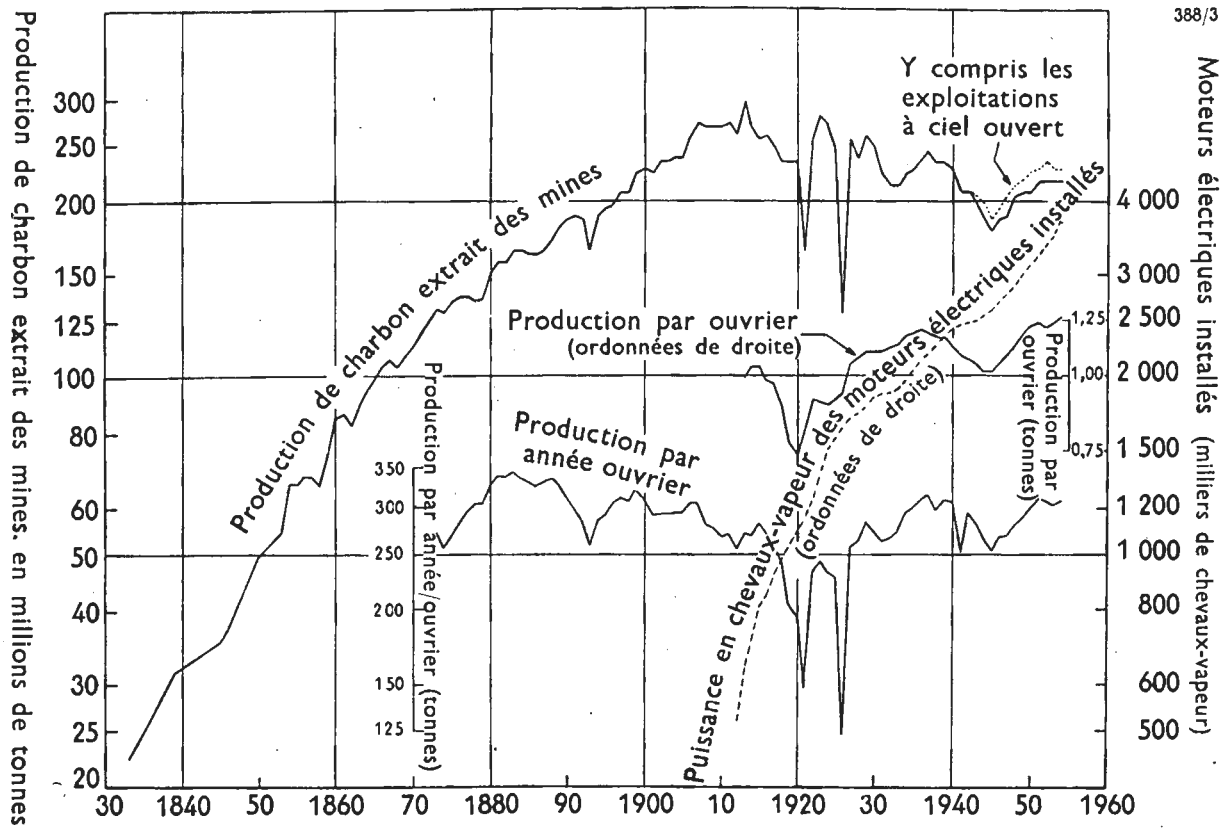


Figure 3. — Production de charbon.

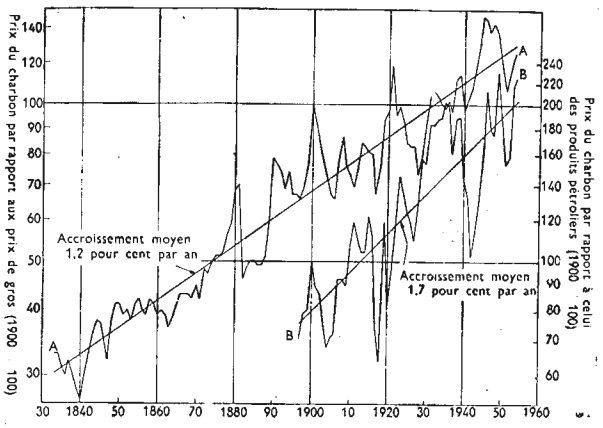


Figure 4. — Prix relatif du charbon.

Variation du prix départ mine du charbon divisée par la variation : A. Des prix de gros; B. Du prix des produits pétroliers (prix moyen c.a.f. du pétrole lampant pour 1897-1924, du diesel-oil et du fuel-oil ensuite).

se sont considérablement aggravés au cours de la période 1913-1946. L'effondrement du commerce d'exportation et de celui des soutes, joint au marasme du marché intérieur, ont fait tomber la demande totale de 287 millions de tonnes en 1913 à 188 millions de tonnes en 1945. Les investissements ont été faibles, et les fonctions de cadre technique ou d'administrateur de l'industrie charbonnière ont attiré peu de candidats. Deux guerres ont encore accentué la contraction de la capacité de production et l'insuffisance des cadres. Une vaste réorganisation s'impose; elle est maintenant en cours. Le montant des capitaux investis dans les charbonnages, à l'exclusion des activités auxiliaires, est passé de 27 millions de livres sterling en 1951 à 68 millions de livres sterling en 1954; il devrait bientôt être proche de 90 millions de livres sterling par an. Pourtant, une très grande partie de ces capitaux est nécessaire pour assurer le simple maintien de la production à son niveau actuel, et le « National Coal Board » n'a pas été en mesure, jusqu'à présent, de promettre que la production des mines serait portée du niveau de 1954, soit 214 millions de tonnes, à plus de 250 millions de tonnes, auxquelles s'ajouterait un complément provenant des exploitations à ciel ouvert, qui produisent pour le moment 10 millions de tonnes par an.

Le pétrole contribue pour une bonne part à la solution du problème de l'énergie; le développement de la consommation de pétrole a été favorisé par les avantages que présente ce combustible sur le plan technique, et par la baisse marquée de son prix par rapport à celui du charbon, ainsi du reste que par la pénurie de charbon. Les quantités de pétrole brut raffinées dans le pays sont passées de 2,5 millions par an avant la guerre à 29 millions de tonnes en 1954, et la consommation intérieure de produits pétroliers est passée de 9 millions à 21 millions pendant la même période, le taux d'accroissement étant de 10 pour cent par an en moyenne depuis 1946. On encourage le développement de l'utilisation du pétrole. On procède également à des recherches pour trouver des dépôts de gaz naturel, et l'on travaille à intensifier l'exploitation d'autres sources d'énergie, comme le méthane provenant des charbonnages et la tourbe. Néanmoins, le charbon est toujours, et de loin, la plus importante source d'énergie, et les difficultés auxquelles se heurte le développement de sa production causent de vives préoccupations.

CONCLUSION

Nous avons donc vu le vieil « atelier », qui produisait il y a cent ans plus de charbon que tous les autres pays réunis, et dont l'importance, dans le domaine industriel, a depuis été dépassée par celle d'autres pays, a récemment rencontré de grosses difficultés pour se procurer du combustible en quantité suffisante. Ces difficultés proviennent de la grande accélération qui s'est produite dans le développement de la consommation de combustibles; mais elles tiennent également au fait que l'extraction de charbon devient de plus en plus difficile, les gisements les plus accessibles étant épuisés. Le sol recèle encore de grandes quantités de ce minéral (plus de 150 milliards de tonnes), mais le coût de l'extraction augmente régulièrement par rapport aux autres prix, et les difficultés dues aux circonstances naturelles ont été renforcées par le déclin de l'industrie charbonnière entre 1913 et 1946. La contribution du pétrole continuera d'être importante, mais il doit être importé, et, quand les réserves actuelles de pétrole auront été sensiblement entamées, il se posera là aussi de sérieux problèmes. Le programme britannique relatif à l'énergie nucléaire répond donc à une nécessité bien claire, et la découverte des moyens permettant d'utiliser cette source d'énergie pour des fins pratiques est opportune, sinon providentielle. Le combustible n'est pas un produit comme les autres. A l'instar du travail humain lui-même, il est à la base de toute l'activité économique. Et si, par certaines de ses applications, l'énergie nucléaire nous met au bord d'une catastrophe, elle nous paraît contenir d'immenses promesses, comme moyen de renforcer le fondement énergétique sur lequel repose la civilisation.

BIBLIOGRAPHIE

1. *A programme of nuclear power*, H.M.S.O., 1935, Cmd. 9389.
2. Jevons W. S., *The coal question*, 1865.
3. British transport commission, *Modernisation and re-equipement of British railways*, 1955, Londres.
4. Wilkins L. T., *Domestic utilisation of heating appliances and expenditures on fuels in 1948/49*, The Social Survey, 1951.
5. Williamson James, *Water power development in Great Britain*, Engineering, 1949, vol. 168, nº 4372. Peattie J. D. et Fulton A. A., *Integration of hydro and thermal generation in Great Britain*, Conférence mondiale de l'énergie, Rio de Janeiro, 1954.
6. Plot Robert, *Natural history of Staffordshire*, Oxford, 1686.

Un siècle d'accroissement des besoins d'énergie électrique aux États-Unis d'Amérique

par E. T. Hughes* et N. C. Nelson**

Dans ce rapport, nous interpréterons l'expression « besoins d'énergie » dans le sens large où elle s'applique à la fois au courant fourni par les centrales et à l'utilisation de ce courant par le consommateur. Il est impossible de considérer séparément la fourniture et l'utilisation, car à tout moment la quantité de courant fourni doit être égale à la quantité utilisée plus les pertes qui se produisent dans sa transmission et sa distribution. Nous examinerons de préférence le passé, et n'essaierons point de supputer la capacité requise dans l'avenir; nous réfléchirons cependant quelque peu à ce dernier aspect de la question, pour y trouver une indication quant à l'ampleur du marché qui s'offre à l'électricité de source nucléaire. Il va de soi que nous ne pouvons faire aucun plan d'avenir sans être parfaitement au courant de la situation actuelle et des étapes qui ont marqué dans le passé le développement et les progrès de la production d'électricité. Nous espérons également que l'expérience des États-Unis d'Amérique sera des plus utiles au reste du monde, et surtout aux pays qui commencent à peine à installer d'importants moyens de production d'électricité, parmi lesquels les piles nucléaires ne tarderont peut-être pas à trouver place.

Il peut sembler vain de se demander à quoi ressemblerait le monde sans électricité. Nous ne pourrions envisager de vivre sans air, sans eau, sans nourriture et sans soleil, et nous estimons que l'électricité nous est à peu près aussi indispensable. Et cependant, il ne s'est écoulé que bien peu de temps dans l'histoire du monde depuis que nous disposons de ce bien si précieux. L'industrie électrique américaine a célébré en 1954 son soixante-huitième anniversaire en évoquant le chemin parcouru depuis qu'Edison fabriqua la première lampe à incandescence en 1879.

Le premier « grand » générateur électrique, d'une capacité de 120 kW, fut mis en service à la centrale de Pearl Street, à New York, le 4 septembre 1882. Cette centrale avait une capacité totale inférieure à 1 000 kW, et elle fournissait en courant continu un petit nombre d'abonnés du voisinage. La première centrale hydraulique des États-Unis d'Amérique, la centrale de Vulcan Street, fut mise en marche quelques jours plus tard, le 30 septembre 1882. Équipée de générateurs de 12,5 kW, elle était située sur la rivière Fox, à Appleton, Wisconsin. A la fin du siècle, soit en 1900, le générateur le plus puissant développait 5 000 kW : en effet, c'est un élément de cette importance, mû par une machine à mouvement alternatif, qui fut installé à la centrale de la 74e rue de l'Interborough Rapid Transit Co. à New York. La capacité totale de la centrale était à ce moment de 45 500 kW. La même année vit l'installation à Hartford, Connecticut, de la première turbine à vapeur utilisée dans une centrale desservant un réseau public aux États-Unis. Cette centrale était exploitée par la Hartford Electric Light Co., et son débit était évalué à 2 000 kW.

Nous ne possédons que des renseignements incomplets sur l'utilisation de l'électricité au début de ce siècle. Le premier rapport du Bureau du Recensement relatif à la production d'électricité destinée au public porte sur l'année 1902. En lisant ce document, d'un grand intérêt rétrospectif, nous nous émerveillons devant le développement qu'a pris cette industrie depuis la période héroïque, surtout si nous nous rappelons qu'aux yeux des contemporains, elle semblait déjà avoir atteint son plein développement. Le rapport de 1902, par exemple, tente de prévoir l'avenir et fait allusion dans les termes suivants à l'année 1907 : « Les chiffres du prochain recensement exprimeront sans doute encore un pourcentage élevé d'accroissement, et contiendront certainement des statistiques portant sur de nombreuses applications nouvelles qui, jusqu'ici, ne semblaient pas relever des possibilités des centrales. Cependant, ces chiffres montreront peut-être que cette industrie poursuit une évolution ordonnée et remplit des fonctions déjà parfaitement définies, comme il se doit d'une industrie établie sur des bases solides. » Néanmoins, les renseignements dont on disposait alors sur l'utilisation de l'électricité manquaient encore d'exactitude, comme le laisse entendre cette autre phrase, empruntée au même rapport : « Certaines des centrales les plus importantes s'efforcent, à l'aide d'instruments

---

Original : anglais.

* Chef de la section des approvisionnements en énergie, Bureau de l'électricité, Commission fédérale de l'énergie, Washington 25, D.C.

** Chef de la section des besoins en énergie, Bureau de l'électricité, Commission fédérale de l'énergie, Washington 25, D.C.

appropriés de grande capacité, de mesurer exactement tout le courant produit par leurs générateurs à chaque heure du jour et de la nuit. D'autres ne mesurent pas le courant, mais fondent leurs évaluations de production sur la lecture, faite de temps à autre, des indications données en volts, ampères et watts par leurs tableaux de commande, ou encore calculent, lorsqu'ils en ont les moyens, la capacité de consommation des appareils auxquels le courant est fourni. »

Il ressort clairement de ce rapport que les entreprises productrices d'électricité alimentant un réseau public tiraient le plus clair de leurs revenus, en 1902, de la consommation de courant sous forme de lumière dans les lampes à arc et dans les lampes à incandescence. Il existait cependant quelque 50 000 centrales isolées, appartenant pour la plupart à l'industrie minière ou à l'industrie manufacturière, qui n'avaient pas été recensées dans le rapport. La production de ces centrales isolées était surtout utilisée comme force motrice, ou dans l'industrie électrochimique. En 1902, la capacité installée aux États-Unis d'Amérique était au total de l'ordre de 3 millions de kW, dont 40 pour cent environ appartenait à des entreprises alimentant un réseau public, le reste, soit 60 pour cent, étant réparti entre les centrales d'usines, de chemins de fer électriques et autres. La quantité totale d'électricité produite en 1902 par l'ensemble des centrales aux États-Unis était d'environ 6 milliards de kWh (6×10^9); autrement dit, l'utilisation annuelle moyenne de la capacité de production n'atteignait que 2 000 heures environ, alors qu'elle atteint 5 000 heures actuellement. Le prix moyen de l'électricité pour tous usages était alors voisin de 4 cents le kWh, contre 1,75 cent de nos jours; si l'on considère qu'aujourd'hui le pouvoir d'achat de la monnaie américaine est probablement plus élevé d'un tiers ou d'un quart qu'en 1902, on voit que le prix réel de l'électricité à cette époque était approximativement huit fois plus élevé qu'à notre époque. Les progrès qui ont entraîné une telle réduction de prix se sont étendus à de trop nombreux domaines pour que nous puissions les analyser dans un rapport aussi bref que celui-ci; nous énumérerons cependant, parmi les faits importants qui y ont contribué, la qualité toujours améliorée de l'équipement, l'établissement d'interconnections entre les sources d'approvisionnement, et le meilleur rendement des appareils générateurs.

La technique de production de l'électricité a fait des progrès sensationnels. Comme on l'a déjà vu, la première turbine à vapeur produisant de l'électricité pour le public a commencé à fonctionner aux États-Unis en 1900. Elle développait 2 000 kW. Cependant, le générateur mû par une machine à mouvement alternatif se développait toujours davantage, et la puissance de 12 000 kW fut atteinte en 1903 par un élément installé à la centrale de Fisk Street de la Commonwealth Edison Co. de Chicago. La machine à mouvement alternatif fut graduellement remplacée par la turbine à vapeur, et en 1915 la plus grande turbine à vapeur qui fonctionnât était celle de 45 000 kW installée à la centrale de Conners Creek de la Detroit Edison Co. Cette centrale avait alors une capacité installée de 180 000 kW. Dix ans plus tard, en 1925, l'élément le plus important des États-Unis d'Amérique était celui de la centrale de Crawford Avenue de la Commonwealth Edison Co. de Chicago, dont la puissance atteignait 60 000 kW. Les groupes turbogénérateurs les plus remarquables que l'on construise actuellement sont peut-être ceux qu'ont commandés la Philadelphia Electric Co. et l'American Gas & Electric Co., qui doivent fournir respectivement 275 000 et 120 000 kW. Ces deux groupes, qui doivent entrer en service en 1957, utiliseront des pressions allant au-delà du « niveau critique ». Leur pression au registre sera de 351,5 à 316,35 kg/cm² à 621,1 °C, et elles seront équipées de deux étages de réchauffage.

Il existe actuellement aux États-Unis une vingtaine de centrales à vapeur approchant des 500 000 kW ou dépassant cette puissance; certaines même atteignent une puissance de l'ordre du million de kW, ou plus. L'avantage offert par des centrales de cette importance, équipées de très grands générateurs, réside naturellement dans l'abaissement des coûts en capital et dans leur rendement plus élevé. Étant donné l'intérêt que l'on porte actuellement à l'utilisation de l'énergie atomique pour la production d'électricité, il peut être intéressant à cet égard de rappeler les progrès réalisés aux États-Unis, au cours des ans, dans l'utilisation des combustibles en vue de la production d'électricité. Au début du siècle, la centrale dont le rendement était cité en exemple était celle de Waterside, appartenant à l'actuelle Consolidated Edison Co. de NewYork, qui s'enorgueillissait de consommer 41 250 Btu (env. 10 000 kcal) par kWh net. Une quinzaine d'années plus tard, la centrale de Lake Shore de la Cleveland Electric Illuminating Co. fonctionnait à un taux calorique de 33 200 Btu (env. 8 000 kcal) par kWh net. En 1925, le rendement des centrales était passé à 14 250 Btu (env. 3 500 kcal) par kWh net. A la fin de la seconde guerre mondiale, en 1945, la centrale de Port Washington de la Wisconsin Electric Power Co. franchit un nouveau record de rendement avec 10 500 Btu (2 500 kcal) par kWh. Les chiffres des centrales pour 1954 n'étaient pas encore connus au moment où le présent rapport a été rédigé. Toutefois, il est intéressant de noter qu'en 1953 19 centrales fonctionnaient aux États-Unis, dont le taux calorique était inférieur à 10 000 Btu (2 450 kcal) par kWh net, le taux le plus bas étant de 9 170 Btu (2 310 kcal).

En regard des taux caloriques de ces 19 centrales, on peut citer le taux envisagé de 8 000 Btu (2 000 kcal) par kWh net du nouvel élément à deux réchauffeurs que la Philadelphia Electric Co. pense mettre en service en 1957 et qui développera 275 000 kW à une pression de 351,5 kg/cm² et une température de 621,1 °C. Le tableau 1 montre, sous une forme simplifiée, l'amélioration du rendement

Tableau 1

Consommation de combustibles des centrales à vapeur aux États-Unis d'Amérique

Année	Livres (*avoirdupois*) de charbon		Année	Livres (*avoirdupois*) de charbon	
	Par kWh	Par kg		Par kWh	Par kg
1900	6,80	2,756	1930	1,60	0,783
1905	6,00	2,721	1935	1,44	0,652
1910	4,90	1,854	1940	1,34	0,607
1915	3,80	1,379	1945	1,30	0,589
1920	3,00	1,360	1950	1,19	0,538
1925	2,00	0,907	1953	1,06	0,498

des centrales à vapeur aux États-Unis pendant un certain nombre d'années. Ce tableau, qui ne tient compte que des centrales produisant pour les réseaux publics, donne le poids moyen (exprimé en livres « avoirdupois ») du combustible nécessaire à la production d'un kWh net d'énergie électrique, ou son équivalent en fuel-oil ou en gaz.

Les centrales qui alimentent les réseaux les plus importants fonctionnent indifféremment au charbon, au fuel-oil ou au gaz; elles peuvent aussi utiliser ces trois combustibles à la fois; ceci permet à la direction des centrales de choisir à son gré celui des trois qui sera le plus facile à obtenir, ou le moins coûteux. Grâce à la souplesse de ce système, on a pu réaliser d'importantes économies dans les prix de revient de la plupart des réseaux, et — autre avantage important — on a pu affronter aisément les périodes de pénurie de combustible.

Outre la vapeur, les États-Unis d'Amérique utilisent très largement leurs ressources hydrauliques pour assurer leur approvisionnement en électricité. S'il est vrai que la capacité hydroélectrique installée est encore inférieure à la capacité thermique, elle n'en est pas moins fort importante. Le tableau 2 donne des chiffres provisoires de la puissance installée aux États-Unis à la fin de 1954, décomposée par source d'énergie. Les installations alimentant un réseau public et celles qui ne desservent que l'entreprise privée ont été présentées séparément. La plupart de celles qui appartiennent à la seconde catégorie font partie d'établissements industriels. Toutefois, les chemins de fer et les tramways électriques comptent pour environ un million de kilowatts de capacité, et les industries minières pour près de 750 000 kW dans cette catégorie.

Tableau 2

Capacité de production aux États-Unis d'Amérique à la fin de 1954

(En milliers de kWh)

	Réseaux publics	Consommation interne	Total
Hydroélectricité . .	23 211	1 029	24 240
Vapeur	77 102	14 222	91 324
Combustion interne	2 279	1 114	3 393
TOTAL	102 592	16 365	118 957

Les vingt centrales hydrauliques les plus importantes des États-Unis ne sont pas aussi grandes, en moyenne, que les vingt plus grandes centrales à vapeur; cependant, la plus importante des centrales hydrauliques est beaucoup plus grande que la centrale à vapeur qui vient en tête de sa catégorie. La puissance des vingt plus grandes centrales hydrauliques va de 200 000 à près d'un million de kW. Le tableau 3 indique la puissance installée à la fin de 1954 dans les sept centrales hydrauliques les plus importantes des États-Unis. Les six premières d'entre elles appartiennent au Gouvernement fédéral, la septième est aux mains de l'entreprise privée.

Tableau 3

Centrales hydrauliques les plus importantes des États-Unis d'Amérique

Centrale	État	Puissance (en milliers de kW)
Coulee (Bureau of Reclamation)	Washington	1 974
Hoover (Bureau of Reclamation)	Arizona-Nevada	1 250
Bonneville (Corps of Engineers)	Oregon	522
Wilson (Tennessee Valley Authority)	Alabama	436
McNary (Corps of Engineers)	Montana	420
Shasta (Bureau of Reclamation)	Californie	379
Schoellkopf (Niagara Mohawk Power Corp.) .	NewYork	335

Il est évident que les centrales thermiques peuvent être construites presque partout, alors que les centrales hydrauliques doivent être implantées aux endroits où la hauteur de chute et le débit suffisent à justifier leur installation. Dans un grand nombre de régions industrielles les plus importantes des États-Unis, l'énergie hydroélectrique ne représente qu'une très faible partie des fournitures totales; dans d'autres régions cependant, notamment dans les États de Washington, de l'Oregon, du Montana et de l'Idaho, situés au nord-ouest du pays, la puissance hydroélectrique installée dépasse de loin la puissance thermique. On estime à près de 110 millions de kW les ressources totales en énergie hydroélectrique, équipée ou non, dont disposent les États-Unis; 24 millions de kW environ, soit environ 20 pour cent de ces ressources, sont actuellement

équipés. Les lois de l'économie détermineront quelles fractions des ressources hydrauliques restantes seront équipées dans l'avenir. Il va de soi que si la charge des réseaux continue de s'accroître comme elle l'a fait jusqu'ici, c'est aux centrales thermiques, y compris les centrales nucléaires, qu'il incombera de fournir la plus grande partie de la production supplémentaire.

Avant de passer en revue les diverses charges de consommation auxquelles la puissance installée doit actuellement faire face, examinons brièvement les progrès réalisés dans la transmission d'électricité des centrales aux réseaux d'alimentation jusqu'aux consommateurs. L'acte de naissance de la transmission de courant alternatif aux États-Unis fut la mise en service de la ligne à 14 000 volts, d'une longueur de 13 milles (près de 20 km), construite en 1889 entre Oregon City et Portland (Oregon), par la Willamette Falls Electric Co. Cette ligne servait à transporter le courant de la centrale hydraulique d'Oregon City, équipée de deux générateurs monophasés d'une puissance totale de 720 kW. Ce fut cependant la centrale de Niagara Falls, construite par la Niagara Falls Power Co. en 1896, qui marqua vraiment l'avènement de la production d'électricité dans les « centrales » et démontra les avantages indiscutables du courant alternatif polyphasé aux États-Unis, tant du point de vue de la production que du point de vue de la transmission. La ligne de 22 milles (34 km) reliant la centrale de Niagara Falls à la ville de Buffalo était sous tension de 11 000 volts à 25 périodes. Remarquons en passant que cette compagnie, qui dessert un réseau public de distribution, doit faire face aujourd'hui au problème que pose la conversion de son installation à 25 périodes en une installation à 60 périodes, pour se conformer à la norme de 60 périodes adoptée sur toute l'étendue des États-Unis d'Amérique.

Au début du siècle, plusieurs réseaux américains avaient adopté des tensions allant jusqu'à 33 000 volts pour la transmission du courant. En 1901, la Californie vit construire la première ligne à 60 000 volts, d'une longueur de 142 milles (215 km environ), entre la centrale Colgate, sur la rivière Yuba, et la ville d'Oakland. La Great Western Power Co. construisit en 1908 la première ligne de transport de force à grande distance sous tension de 100 000 volts, pour amener le courant de la centrale de Big Bend, sur la rivière Feather, à Oakland, soit sur une distance de 155 milles (235 km environ). La Californie ne possède pas seulement de très nombreuses installations hydroélectriques; c'est aussi l'état dans lequel fut construite, en 1923, la première ligne à 220 000 volts; et c'est encore en Californie qu'on construisit, en 1934, la première ligne à 287 000 volts, qui relie le barrage Hoover à Los Angeles, sur une distance de 270 milles (415 km). Il est intéressant de remarquer que, jusqu'à une date récente, les progrès constatés dans le transport de force sous tensions élevées ont presque tous été réalisés à l'occasion de la mise en œuvre de plans d'électrification hydroélectrique. En effet, les centrales hydrauliques étaient généralement situées à une assez grande distance des centres de consommation. Actuellement, toutefois, on s'efforce de réduire les distances de transmission et d'attirer de nombreux établissements industriels à proximité des centrales hydrauliques. Nous constatons également que c'est le problème du transport de la force des centrales thermiques situées à la mine jusqu'aux centres de consommation qui a été à l'origine du progrès le plus récent réalisé en la matière : la mise sous tension de 330 000 volts du courant à transporter.

Si nous nous tournons vers l'utilisation de l'énergie électrique, nous ne découvrons actuellement aucun élément qui nous permette de conclure que la consommation doive augmenter à un rythme plus lent dans un avenir proche. Peut-être l'industrie électrique est-elle trop jeune pour que l'on soit justifié à formuler ce genre de conclusion pendant quelques années encore. L'accroissement de la population, l'augmentation de la production par habitant et l'utilisation toujours plus importante d'énergie par unité de fabrication sont autant d'éléments qui semblent garantir la prospérité de cette industrie. Néanmoins, il est hors de doute que le rythme d'accroissement de la consommation se ralentira un jour, mais on ne saurait préciser d'ici combien de temps. D'ailleurs, la courbe suivie par la consommation dans la première moitié de notre siècle offre déjà un sujet de réflexion assez passionnant. Tout au plus pourrons-nous, un peu plus loin, nous interroger sur les perspectives d'avenir.

Comme nous l'avons déjà fait observer, la production d'électricité aux États-Unis atteignait au total 6 milliards environ de kWh (6×10^9) en 1902. En 1954, cette production a presque atteint 545 milliards de kWh (545×10^9). Si nous déduisons de ce chiffre 60 milliards de kWh environ pour tenir compte des pertes et de l'énergie dont l'utilisation n'a pu être justifiée, il reste environ 485 milliards de kWh d'énergie utile dont il est possible de retrouver l'utilisation. Les ménages et les exploitations agricoles en ont consommé près de 120 milliards. Les établissements commerciaux (magasins de vente, bureaux, hôtels, hôpitaux, garages et certains grands immeubles de rapport où l'électricité est distribuée par des compteurs d'immeubles et facturée au tarif du commerce) en ont consommé 75 milliards, à peu de chose près. L'industrie (établissements manufacturiers et mines) a compté pour environ 270 milliards de kWh dans la consommation. Le solde, soit environ 20 milliards de kWh, a été utilisé : comme force motrice par les trains et les tramways électriques, pour l'éclairage des voies publiques, le pompage dans les services municipaux d'adduction d'eau, le pompage du pétrole et du gaz dans les conduites de distribution, par les établissements militaires et les bâtiments publics.

Dans les ménages, la consommation d'électricité a augmenté à une cadence un peu plus rapide que dans les autres secteurs. Cette augmentation est surtout sensible depuis quelques années. Au cours

de la deuxième guerre mondiale s'est produit un accroissement de la population qui ne s'est pas encore ralenti. La compression exercée pendant les années de guerre sur la production destinée aux civils a eu comme contre-coup, après 1945, une demande immense de biens de consommation; et la prospérité générale qui règne depuis dix ans a permis à la population d'acquérir non seulement les objets dont elle avait dû, pendant la guerre, remettre l'achat à plus tard, mais aussi les nombreux autres articles qui ont fait leur apparition sur le marché. Les ventes ont été particulièrement actives dans le secteur des appareils électriques ménagers, destinés aussi bien aux logements existants qu'aux nouveaux logements qu'on a construits et qu'on construit encore à un rythme, inconnu jusqu'ici, de l'ordre d'un million par an. On a enregistré ainsi une hausse très sensible de la consommation d'énergie dans les ménages, due tant à l'augmentation de la consommation d'électricité par abonné qu'à l'apparition de nouveaux abonnés.

La consommation moyenne par abonné en 1954 était d'environ 2 550 kWh pour l'ensemble des États-Unis. La consommation moyenne des ménages est de l'ordre de 7 à 9 000 kWh dans de nombreuses localités et dépasse 10 000 kWh par abonné dans certaines autres. Dans certains ménages, la consommation annuelle dépasse très largement 10 000 kWh. Un logement de grandeur moyenne, complètement électrifié et équipé d'une installation de chauffage et de circulation d'air frais, peut utiliser 25 000 kWh par an, voire plus.

Il sera peut-être intéressant d'examiner quelques utilisations particulièrement caractéristiques de l'énergie électrique dans les ménages. Depuis un certain nombre d'années, divers organes professionnels publient des renseignements sur les ventes d'appareils électriques. Ces données concernent environ trente catégories d'appareils. Il ressort que les chauffe-eau, les frigorifiques et les cuisinières sont de loin les appareils qui consomment le plus de courant. Bien que 15 pour cent seulement des maisons soient équipées de chauffe-eau électrique, cet appareil, en raison de sa consommation unitaire élevée, est probablement la source de consommation domestique la plus importante du pays, abstraction faite des appareils d'éclairage. Il serait suivi de très près par les frigorifiques, non pas que ces appareils aient une consommation unitaire élevée, mais parce qu'ils existent dans 90 à 95 pour cent des logements. Ensuite viendraient les cuisinières électriques, que l'on trouve dans 25 pour cent environ des logements. Il est bien évident que toute évaluation de l'utilisation d'appareils électriques ménagers ne peut être qu'approximative. Les renseignements sur les ventes sont assez exacts, mais on est moins bien fixé sur le nombre d'appareils mis au rebut parce qu'ils sont hors d'usage ou trop vieux. De même, dans la mesure où la consommation d'énergie varie selon la taille de l'appareil, son utilisation et d'autres facteurs encore, les chiffres de consommation unitaires ne sont, eux aussi, qu'approximatifs. Les trois appareils ci-dessus : le chauffe-eau, le frigorifique et la cuisinière comptent probablement pour moitié dans la consommation domestique d'énergie. L'éclairage y compte probablement pour un quart. Reste environ un quart pour de nombreux autres appareils, tous d'un usage très répandu, parmi lesquels on peut citer les radiateurs électriques et les rafraîchisseurs d'air.

Les ventes d'appareils de climatisation et surtout de rafraîchisseurs se sont beaucoup développées depuis quelques années. Il est impossible de dire combien de ces appareils ont été installés dans des immeubles à usage commercial, particulièrement dans des bureaux, et combien équipent des maisons d'habitation. Nous ne pouvons pas davantage évaluer avec précision leur consommation unitaire. Nous savons toutefois que les pointes de consommation enregistrées pendant l'été par un certain nombre de réseaux de distribution d'électricité se sont fortement accusées au cours des dernières années en raison de l'énergie consommée par des appareils de climatisation, et que dans de nombreuses régions, la charge de pointe survient l'été, et non plus l'hiver comme autrefois. C'est pourquoi les centrales d'énergie électrique étudient le moyen d'équilibrer la charge d'été et la charge d'hiver au moyen du chauffage électrique, surtout dans les logements. Alors que le chauffage électrique direct des maisons d'habitation est déjà très largement répandu dans la région du nord-ouest Pacifique et dans la région desservie par la Tennessee Valley Authority, ainsi que dans d'autres localités où les prix du courant sont suffisamment avantageux, ce mode de chauffage ne peut d'une manière générale soutenir la concurrence d'autres combustibles aux prix actuellement pratiqués. En revanche, le circulateur thermique électrique, appareil au sujet duquel on a beaucoup écrit, paraît devoir constituer à l'avenir une source importante de consommation de courant. Les évaluations de la consommation domestique varieront très largement selon la place qui sera faite dans les hypothèses aux circulateurs thermiques, et la question se complique non seulement du fait de l'existence de facteurs techniques, mais aussi pour des raisons d'ordre général.

On se montrerait négligent si l'on abandonnait la question de l'utilisation domestique de l'électricité sans avoir parlé des factures d'électricité. Une étude de ces factures portant sur un certain nombre d'années donnerait des résultats intéressants. Elle ferait apparaître d'importantes variations dans le montant moyen des factures libellées pour les diverses localités du pays; mais si l'on groupait les localités, on s'apercevrait que les factures n'accusent que de faibles variations d'année en année, sous réserve que leur montant soit ajusté de manière à tenir compte des changements survenus dans le pouvoir d'achat du dollar. A mesure que la consommation par abonné a augmenté d'année en année, le prix du kWh a baissé, de même que le pouvoir d'achat du dollar, si bien qu'en moyenne les factures d'électricité consommée pour les usages

domestiques, ajustées pour tenir compte de l'inflation des prix, n'ont pas beaucoup changé. En fait, l'abonné d'une compagnie privée reçoit, dans l'ensemble, des factures à peu près équivalentes à celles que présentent les compagnies du secteur public, mais l'abonné de ces dernières dispose d'une plus grande quantité d'électricité pour son argent. Le chauffage électrique peut modifier cet état de choses et en fait il a peut-être commencé à le modifier. Nous avons ici une situation où un combustible vient en remplacer un autre sans créer de charges financières supplémentaires pour les consommateurs, et si le chauffage électrique se répand largement, les factures d'électricité consommée pour les usages domestiques augmenteront sensiblement, elles aussi.

Nous ne disposons pas d'assez de place pour examiner ici la plupart des autres utilisations de l'électricité. Nous nous arrêterons toutefois un instant aux utilisations industrielles, qui à elles seules représentent plus de la moitié du total de la consommation finale. L'industrie achète la plus grande partie de son courant aux compagnies d'électricité alimentant les réseaux de distribution. Toutefois, plus du quart de ses besoins lui est fourni par ses propres centrales. La quantité d'électricité produite par l'industrie pour son propre usage n'a pas augmenté aussi rapidement que la quantité qu'elle achète aux compagnies productrices; elle est cependant plus importante d'année en année. Certains établissements industriels sont assez vastes pour pouvoir établir de grandes centrales qui fonctionnent avec un rendement excellent et satisfont aux besoins de leur consommation. Un argument en faveur de l'autonomie de production est qu'elle supprime en grande partie les pertes en ligne, pertes inévitables en cas de production externe. Dans d'autres industries les procédés de fabrication entraînent une consommation importante de chaleur ou de vapeur; la charge supplémentaire que représente la quantité additionnelle de chaleur et de vapeur nécessaire à la production d'au moins une partie du courant requis est souvent suffisamment faible pour justifier cette autoproduction d'électricité. Parmi les industries manufacturières, les industries productrices de métaux bruts, en particulier celles de l'acier et de l'aluminium, disposent d'une importante capacité de production d'électricité. Les fabriques de pâte à papier et, d'une manière générale, les usines de produits chimiques, produisent également de grandes quantités d'électricité dans leurs propres centrales. A elles trois, la métallurgie, l'industrie de la pâte et du papier et l'industrie chimique produisent environ 70 pour cent de l'électricité des centrales industrielles.

Dans nos chiffres de consommation d'électricité par l'industrie, nous avons également tenu compte de la consommation de l'industrie atomique. Celle-ci se range, avec la sidérurgie et l'affinage d'aluminium, dans la catégorie industrielle qui consomme le plus d'électricité. Les industries chimiques, et notamment celles du chlore, du carbure de calcium, du phosphore et de l'ammoniaque, sont aussi de grosses consommatrices. Il en est de même de l'industrie des ferro-alliages et des produits du carbone et des papeteries, des usines textiles et des fabriques de machines, voire de l'industrie des produits alimentaires, compte tenu du grand nombre d'établissements qui se livrent à la fabrication de ces produits.

L'établissement industriel moyen est de dimensions réduites. Il y a une dizaine d'années, à un moment où la Federal Power Commission étudiait en détail les besoins de l'industrie en énergie, on constata que, sur un total d'environ 200 000, 21 000 établissements représentaient à eux seuls plus de 90 pour cent des besoins globaux. Dans la grande majorité des usines, la charge n'atteint pas 100 kW. En revanche, il existe un bon nombre d'usines dont la charge atteint et même dépasse 20 000 kW. Les plus grosses aciéries peuvent consommer jusqu'à 200 000 kW. La plus importante usine d'affinage d'aluminium des États-Unis d'Amérique représente une charge de 400 000 kW environ, et les centres les plus importants de l'industrie nucléaire absorbent 2 millions de kW.

Au demeurant, on trouve sans cesse de nouvelles utilisations de l'électricité dans les opérations industrielles. Les applications du rayonnement infra-rouge à la conserverie, l'électrolyse, les ultrasons, les dépoussiéreurs, les appareils à électricité statique, de nombreuses applications de la haute fréquence et même le décorticage des noyaux et des amandes, toutes ces opérations consomment du courant. L'électricité ne remplacera peut-être jamais le cerveau humain, mais elle y supplée d'assez près dans certaines opérations, maintenant que l'automation se fait une place de plus en plus importante dans l'industrie. D'autre part, les publications spécialisées nous informent assez souvent de l'apparition de tel nouveau procédé propre à réduire la consommation d'électricité. C'est ainsi que la Tennessee Valley Authority, qui a tant fait pour développer la consommation, déclare dans son rapport annuel pour 1954 qu'elle vient de terminer une vaste campagne de démonstration, consacrée à un nouvel engrais, le tricalcium de phosphate fondu, qui, selon le rapport, « présente l'avantage de pouvoir être fabriqué sans acide et moyennant une faible consommation d'électricité, à partir de phosphates de qualité inférieure ».

Quoi qu'il en soit, les moyens de réduire la consommation d'électricité ne suffiront certainement pas à contrebalancer l'effet des divers facteurs d'accroissement, et le développement de l'industrie électrique est assuré pendant de nombreuses années encore. L'ensemble des systèmes de production et de distribution de courant électrique des États-Unis d'Amérique représente probablement des investissements plus importants que n'importe quelle autre industrie du pays. Leur équipement vaut, au total, près de 40 milliards de dollars (40×10^9) à l'heure actuelle. Il existe, certes, un bon nombre de sociétés

industrielles qui, prises isolément, sont plus importantes que n'importe quelle compagnie d'électricité; toutefois, la revue *Business Week* énumère, dans son numéro du 23 avril 1955, quatre compagnies d'électricité parmi les trente-deux entreprises qui constituent ce que l'on est convenu d'appeler le « groupe des milliardaires ». Mais du point de vue des recettes annuelles, il est surprenant de constater que les compagnies d'électricité alimentant les réseaux publics ne se classent pas aussi haut. Leurs recettes annuelles ne dépassent guère le quart de la valeur de leurs investissements en capital, alors que dans de nombreuses industries les recettes annuelles dépassent très largement la valeur des investissements. D'après la plaquette publiée par l'Edison Electric Institute (*I Want To Know About the Electric Industry*, édition de 1954-1955), le total des recettes annuelles de toutes les sociétés industrielles est égal à une fois et demie la valeur des capitaux investis.

Si l'industrie de l'électricité destinée à la consommation du public doit se développer à une cadence telle qu'elle double d'importance tous les dix ans, le montant actuel des capitaux qui y sont investis paraîtra bien peu de chose à la fin de ce siècle. Lorsque l'on évoque l'augmentation de la charge des réseaux, on a l'habitude de dire qu'elle « double tous les dix ans ». En fait, la charge est loin d'avoir doublé avec une régularité si constante au cours des cinquante-quatre premières années du siècle. Peu après 1900, le taux d'accroissement a été beaucoup plus élevé que dans les années suivantes, et la charge doublait en quatre ans. De 1920 à nos jours, le taux d'accroissement le plus élevé que l'on ait observé sur une période de dix ans a été celui des années 1933 à 1943, de la grande crise à la guerre. En ce temps, la charge doublait en sept ans. C'est entre 1928 et 1938 que le taux décennal a été le plus faible; en prenant cette période pour base, il eût fallu admettre que la charge ne doublait qu'en vingt-deux ans. Il est donc difficile, en se reportant simplement au passé, de prévoir le rythme futur d'accroissement. En supposant, comme le font les auteurs de certaines évaluations, que l'industrie électrique continuera à doubler d'importance de dix en dix ans, nous arriverions très rapidement à des chiffres impressionnants. Dans un demi-siècle, soit peu après l'an 2000, son accroissement annuel calculé selon cette hypothèse égalerait presque le double de l'accroissement total pendant les soixante-quinze premières années de son existence. En poursuivant encore ce raisonnement, nous trouverions qu'à la fin d'une période d'un siècle (donc, d'une période relativement brève), l'accroissement annuel de l'industrie électrique représenterait plus de cinquante fois son accroissement total pendant les soixante-quinze années qui nous séparent maintenant de sa naissance.

Toutefois, s'il est logique, nous semble-t-il, de supposer que cette industrie puisse encore doubler d'importance, ou presque, dans les dix années à venir, il ne l'est pas moins de penser que le rythme de son accroissement se ralentira à un moment ou à un autre, avant l'an 2000. Nous croyons faire preuve d'un optimisme suffisant en espérant que cet accroissement se traduira constamment par une ligne droite jusqu'à la fin du siècle. Mais soyons plus optimistes encore, et supposons que la consommation augmente, pendant les seize années qui nous séparent de 1970, à une cadence telle qu'elle « doublerait tous les dix ans ». Supposons également que, par la suite, c'est-à-dire pendant les trente dernières années du siècle, elle augmente suivant une ligne droite, d'une quantité annuelle égale à celle dont elle aurait augmenté en l'année 1970. La production totale d'électricité aux États-Unis a atteint, on l'a vu, environ 545 milliards de kilowattheures en 1954. Si elle doublait tous les dix ans, son taux annuel composé d'accroissement serait de 7,18 pour cent. En appliquant ce taux aux besoins de 1954, on aboutirait à une charge de 1 540 milliards de kilowattheures en 1969 et de 1 650 milliards en 1970. En supposant que la charge s'accroisse chaque année de 110 milliards de kilowattheures après 1970, on arriverait à une charge totale de 4 950 milliards de kilowattheures en l'an 2000. Arrondissons à 5 000 milliards de kilowattheures pour plus de commodité (5×10^{12}). Si nous maintenons au chiffre actuel de 5 000 heures le chiffre d'utilisation de la capacité de production, nous devrions posséder à la fin du siècle une puissance installée de l'ordre de 1 milliard de kilowattheures, contre les quelque 120 millions de kilowattheures dont nous disposons actuellement. A supposer que le pays épuise la plus grande partie de ses ressources hydrauliques dans les cinquante prochaines années, il lui resterait encore à trouver d'autres sources pour produire 900 millions de kilowattheures environ.

Prenons pour hypothèse que les ressources de pétrole et du gaz naturel qui subsisteront en l'an 2000 seront réservées à des utilisations plus directes, et qu'elles ne serviront absolument pas à chauffer des chaudières. Si nous laissons de côté des sources d'énergie telles que le vent, les marées et le soleil, il résulterait de cette hypothèse que le charbon et les combustibles nucléaires devraient fournir les 900 millions de kilowattheures de puissance installée dont les États-Unis auraient besoin en l'an 2000 selon nos calculs. Si le charbon était le seul combustible dont nous disposions alors, et si trois quarts de livre « avoirdupois » (340 grammes environ) fournissaient 1 kilowattheure, les besoins des États-Unis en charbon pour la seule production d'électricité s'élèveraient à environ 1 700 millions de tonnes par an, contre une production de 400 millions de tonnes (pour toutes utilisations) en 1954, dont 140 millions de tonnes ont sans doute été utilisées dans les centrales. On voit donc qu'il est hors de doute que les combustibles nucléaires et le charbon joueront ensemble un rôle prédominant dans la production d'électricité autour de l'an 2000. Des considérations économiques, ainsi que la facilité ou la difficulté d'accès aux combustibles, détermineront pour chaque emplacement donné la part

d'énergie électrique à tirer des combustibles nucléaires, et la part que devront fournir les combustibles fossiles ou d'autres sources.

Sans trop nous préoccuper de l'exactitude rigoureuse des prédictions, nous sommes convaincus cependant qu'il est possible de faire à coup sûr un certain nombre de généralisations et qu'un peu de fantaisie, si l'on veut s'y livrer, n'aggrave pas les incertitudes qui subsistent. On peut avec certitude attendre de la seconde moitié du siècle des progrès presque aussi importants que ceux dont la période 1900-1950 a été le témoin. Dans les plans que nous élaborons actuellement, de nombreux éléments indiquent bien que l'énergie atomique sera pleinement mise au service de la production d'électricité avant l'an 2000. Le plus gros groupe turbo-générateur sera beaucoup plus considérable que celui qui a été mis en service en 1929 à la centrale de State Line de la Chicago District Generating Corporation, qui produit 210 000 kWh et qui est encore aujourd'hui le groupe turbo-générateur le plus important qui soit en service. En fait, la Tennessee Valley Authority doit mettre en service en janvier 1956 un groupe de 225 000 kWh qui fonctionnera à une pression de 154,06 kg/cm^2 et à une température d'environ 537 °C. La Detroit Edison Co. et la Consolidated Edison Co. ont l'une et l'autre commandé des groupes de 300 000 kilowatt-heures qui doivent entrer en service en 1955. Ainsi, à la fin de ce siècle, il se peut que les groupes turbo-générateurs à vapeur de l'ordre du million de kWh soient chose courante. On aura alors découvert le moyen de domestiquer l'énergie atomique de telle façon que les piles nucléaires fourniront aux turbines à vapeur des pressions qui se situeront au-delà de la zone critique, à des températures qui seront relativement aussi élevées. La recherche sera parvenue au point où une transformation directe de l'énergie atomique en énergie électrique, sans passer par l'intermédiaire de la vapeur, paraîtra une réalisation prochaine. La production d'énergie électrique se fera uniquement dans de grandes centrales ayant des puissances installées de l'ordre de 5 millions de kWh. Cette concentration s'expliquera par la nécessité de disposer d'un personnel très spécialisé pour assurer le fonctionnement d'une centrale nucléaire, et en particulier pour évacuer les cendres nucléaires. Grâce à la construction de grandes centrales et de réseaux de transmission à haute tension (550 kV) les coûts unitaires en capital demeureront dans le même ordre de grandeur qu'actuellement, même si le coût de la vie est alors plus élevé. Bien que nous vivions maintenant au siècle merveilleux de la machine, le progrès sera assurément plus fantastique encore pour les années à venir qu'il ne l'a été jusqu'ici. L'électricité continuera d'être au service de l'humanité, et permettra d'améliorer la vie quotidienne bien au-delà de tout ce que nous pouvons imaginer.

Évaluation des besoins de l'Uruguay en énergie pendant les périodes 1955-1975 et 1975-2000

par Walter S. Hill* et Germán E. Villar**

CRITÈRES ADOPTÉS POUR L'ÉVALUATION DES BESOINS FUTURS DE L'URUGUAY EN ÉNERGIE

Pour évaluer les besoins futurs de l'Uruguay en énergie, on a utilisé principalement les statistiques de l'Administración General de Usinas Eléctricas y Teléfonos del Estado, qui sont représentées à la figure 1. Cette figure illustre la régularité de l'accroissement de la consommation d'énergie électrique en Uruguay de 1948 à 1954.

La variation de la consommation d'énergie durant cette période suit pratiquement la même courbe que la consommation de 1935 à 1940.

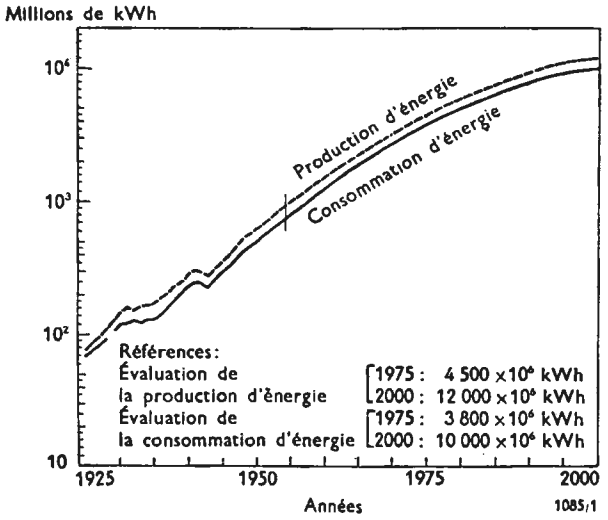


Figure 1. — Évaluation des besoins de l'Uruguay en énergie (périodes 1955-1975 et 1975-2000).

La courbe fait ressortir les perturbations occasionnées dans la consommation d'énergie entre 1940 et 1948 par les restrictions dues à la pénurie de combustibles pendant la seconde guerre mondiale et les premières années de l'après-guerre.

Dans l'évaluation de la consommation d'énergie durant la période 1955-1965, nous avons supposé que le rythme d'accroissement de la consommation, constaté pendant la période 1935-1955 (exception faite de la période anormale de 1940 à 1948) se maintiendrait. Cette supposition est justifiée, puisque les caractéristiques générales du développement industriel et démographique du pays au cours des vingt dernières années n'ont pas changé; aucune raison ne motive un accroissement plus rapide de la consommation d'énergie électrique, comme il arrive dans certaines régions où l'utilisation d'énergie augmente considérablement lorsque l'on met à la disposition des populations des ressources importantes d'énergie hydroélectrique à bas prix.

En raison des caractéristiques géographiques du pays, l'Uruguay est obligé de construire des ouvrages onéreux pour exploiter l'énergie hydraulique. C'est pourquoi, bien que l'exploitation des ressources hydrauliques se justifie amplement au point de vue économique, l'Uruguay ne pourra réduire sensiblement le prix de revient de l'énergie de façon à assurer le développement préférentiel de certaines industries, par l'application de tarifs spéciaux permettant de répartir équitablement l'énergie produite à bas prix dans de vastes centrales hydrauliques.

L'extrapolation pour les années 1965-2000 est plus difficile à faire que pour la période 1955-1965. Il a fallu tenir compte ici de nombreux facteurs.

Si l'on admet que la loi de l'accroissement de la consommation, appliquée à la période 1955-1965 est toujours valable pour la période 1965-2000, on obtient des chiffres exagérément élevés par rapport à l'augmentation probable de la population. La consommation unitaire d'énergie serait bien supérieure à ce qu'elle est actuellement dans les pays industrialisés où l'énergie est à bon marché. Il est donc nécessaire, de toute évidence, de modifier le critère utilisé dans notre calcul. Pour déterminer la courbe de la consommation d'énergie électrique

---

Original : espagnol.

Le présent mémoire a été rédigé à la demande du Conseil national du Gouvernement; ce travail a été effectué en collaboration étroite avec les techniciens de l'Administration générale des usines électriques et des téléphones de l'État.

* Directeur de l'Institut de physique de la Facultad de Ingeneria y Agrimensura.

** Directeur de l'Institut de technologie et de chimie de la même Faculté.

de 1965 à 2000, on a donc jugé préférable d'effectuer une interpolation entre la consommation prévue pour 1965 et celle que l'on pourrait escompter en l'an 2000, compte tenu du nombre d'habitants du pays à cette date et de la consommation unitaire correspondante d'énergie.

Il est difficile de prévoir avec assez d'exactitude le chiffre de la population de l'Uruguay en l'an 2000; mais, si l'on tient compte des divers facteurs qui influent ou peuvent influer sur le développement démographique du pays, et si l'on considère en particulier l'accroissement naturel ainsi que l'apport dû à l'immigration, on peut estimer que la population de l'Uruguay atteindra en l'an 2000 environ 10 millions d'habitants. Le pays aurait ainsi une densité moyenne de 53 habitants au km², chiffre très raisonnable si l'on considère que la densité actuelle est de 16 habitants au km², que toutes les régions de l'Uruguay sont habitables et que l'organisation démocratique du pays et son climat favorable attirent tout particulièrement les immigrants.

On a calculé la consommation unitaire d'énergie par habitant et par année en tenant compte des données statistiques rassemblées par l'Administration générale des usines électriques et des téléphones de l'État. Lorsque l'on a effectué graphiquement l'extrapolation jusqu'à l'an 2000, on a considéré que les pentes étaient toujours positives, bien que décroissantes, afin de corriger une estimation peut-être excessive de la population. On a ainsi obtenu pour l'an 2000 une consommation moyenne d'énergie électrique de 1 000 kWh par habitant et par année. La consommation moyenne actuelle par habitant et par année est de 235 kWh.

Deux raisons importantes expliquent l'accroissement probable de la consommation unitaire d'énergie électrique au cours des 45 années qui nous séparent de l'an 2000 : 1) le progrès d'un pays est lié à l'utilisation toujours plus grande de l'électricité par ses habitants; 2) le développement industriel d'un pays est également lié à l'augmentation constante de la consommation d'énergie électrique par son industrie, augmentation qui a des répercussions directes sur la progression démographique.

Par conséquent, on peut estimer la consommation annuelle d'énergie électrique en Uruguay, en l'an 2000, à environ 10 000 millions de kWh. Ce chiffre correspond, sur la figure, à l'extrémité de la courbe de consommation prévue pour la période 1965-2000, courbe qui donne une consommation de 1 860 millions de kWh pour 1965.

CONSOMMATION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE EN URUGUAY DE 1955 A 1975

Sur la base des estimations effectuées, on a établi les chiffres (tableau 1) de la consommation annuelle d'énergie pendant la période 1955-1975. Ce tableau indique également les quantités d'énergie qu'il faudra produire pour satisfaire la consommation prévue. On a calculé ces quantités en étudiant les différences, fournies par les statistiques, entre l'énergie produite et l'énergie consommée de 1935 à 1955.

Tableau 1

Consommation annuelle d'énergie électrique prévue en Uruguay pendant la période 1955-1975

Année	Consommation d'énergie (en millions de kWh)	Production d'énergie (en millions de kWh)
1955 . . .	780	960
1960 . . .	1 220	1 480
1965 . . .	1 860	2 250
1970 . . .	2 700	3 250
1975 . . .	3 800	4 500

CONSOMMATION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE EN URUGUAY DE 1975 A 2000

Dans le tableau 2, nous avons réuni les données concernant la consommation annuelle d'énergie pendant la période 1975-2000. Nous avons également indiqué les quantités d'énergie qu'il faudra produire pour satisfaire la consommation prévue.

Tableau 2

Consommation annuelle d'énergie électrique prévue en Uruguay pendant la période 1975-2000

Année	Consommation d'énergie (en millions de kWh)	Production d'énergie (en millions de kWh)
1975 . . .	3 800	4 500
1980 . . .	5 000	5 900
1985 . . .	6 400	7 600
1990 . . .	8 000	9 300
1995 . . .	9 200	11 100
2000 . . .	10 000	12 100

Sources d'énergie utilisables pour répondre aux besoins en énergie de l'Uruguay pendant les périodes 1955-1975 et 1975-2000 et possibilités d'utilisation de l'énergie électronucléaire dans ce pays

par Walter S. Hill* et Germán E. Villar**

I. RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES DE L'URUGUAY PENDANT LA PÉRIODE 1955-1975

Évolution de la courbe des charges limites dans l'alimentation en énergie électrique de l'Uruguay pendant les périodes 1945-1955, 1955-1975 et 1975-2000

Les renseignements statistiques recueillis par l'Administration générale des usines électriques et des téléphones de l'État au sujet des charges limites supportées par les réseaux de distribution d'énergie électrique de 1945 à 1955 ont été reportés sur la figure 1. Les charges limites prévues pour les périodes 1955-1975 et 1975-2000 sont également indiquées sur cette figure.

On a établi ces prévisions en procédant d'abord à une comparaison des consommations d'énergie et des charges limites dans le passé. A partir de ces données, on a calculé la consommation future et les charges limites correspondantes, et l'on a établi la corrélation entre la consommation et les charges limites.

On a ainsi obtenu, pour les charges limites, les valeurs indiquées au tableau 1.

L'énergie thermique de 1955 à 1975

La récente extension de la centrale Batlle y Ordóñez a porté la puissance installée de l'énergie thermique à 185 000 kW.

Dans le programme général de travaux destinés à assurer la fourniture d'énergie électrique nécessaire au pays de 1955 à 1975, il a été prévu de satisfaire à ses besoins croissants en énergie par la mise en exploitation successive de ses ressources hydrauliques. C'est pourquoi, sur le graphique, la puissance thermique installée reste constante jusqu'en 1970, date à laquelle elle subira sans doute une diminution de 19 500 kW en raison de la mise hors service de la centrale Calcagno.

A partir de 1970, la puissance thermique installée sera de 165 000 kW, à moins que des modifications substantielles apportées au programme d'exploitation de l'énergie hydraulique n'obligent à agrandir les installations thermiques avant que le développement de la production d'énergie électronucléaire n'ait atteint le degré de perfectionnement où l'Uruguay pourra envisager les installations nécessaires.

Selon les estimations les plus courantes, les problèmes techniques que pose l'utilisation de l'énergie atomique seront résolus d'ici cinq ou dix ans. Il est donc fort possible qu'il ne soit pas nécessaire d'accroître la puissance des installations thermiques et que la première centrale électronucléaire soit installée en Uruguay avant 1975.

Tableau 1

Charges limites prévues pour les réseaux de distribution d'énergie électrique de l'Uruguay de 1955 à 2000

Année	Charges limites (en kW)	Année	Charges limites (en kW)
1955 . .	210 000	1980 . .	1 000 000
1960 . .	305 000	1985 . .	1 280 000
1965 . .	450 000	1990 . .	1 600 000
1970 . .	550 000	1995 . .	1 950 000
1975 . .	790 000	2000 . .	2 280 000

Original : espagnol.

Le présent mémoire a été rédigé à la demande du Conseil national du Gouvernement; ce travail a été effectué en collaboration étroite avec les techniciens de l'Administration générale des usines électriques et des téléphones de l'État.

* Directeur de l'Institut de physique de la Facultad de Ingeneria y Agrimensura.

** Directeur de l'Institut de technologie et de chimie de la même Faculté.

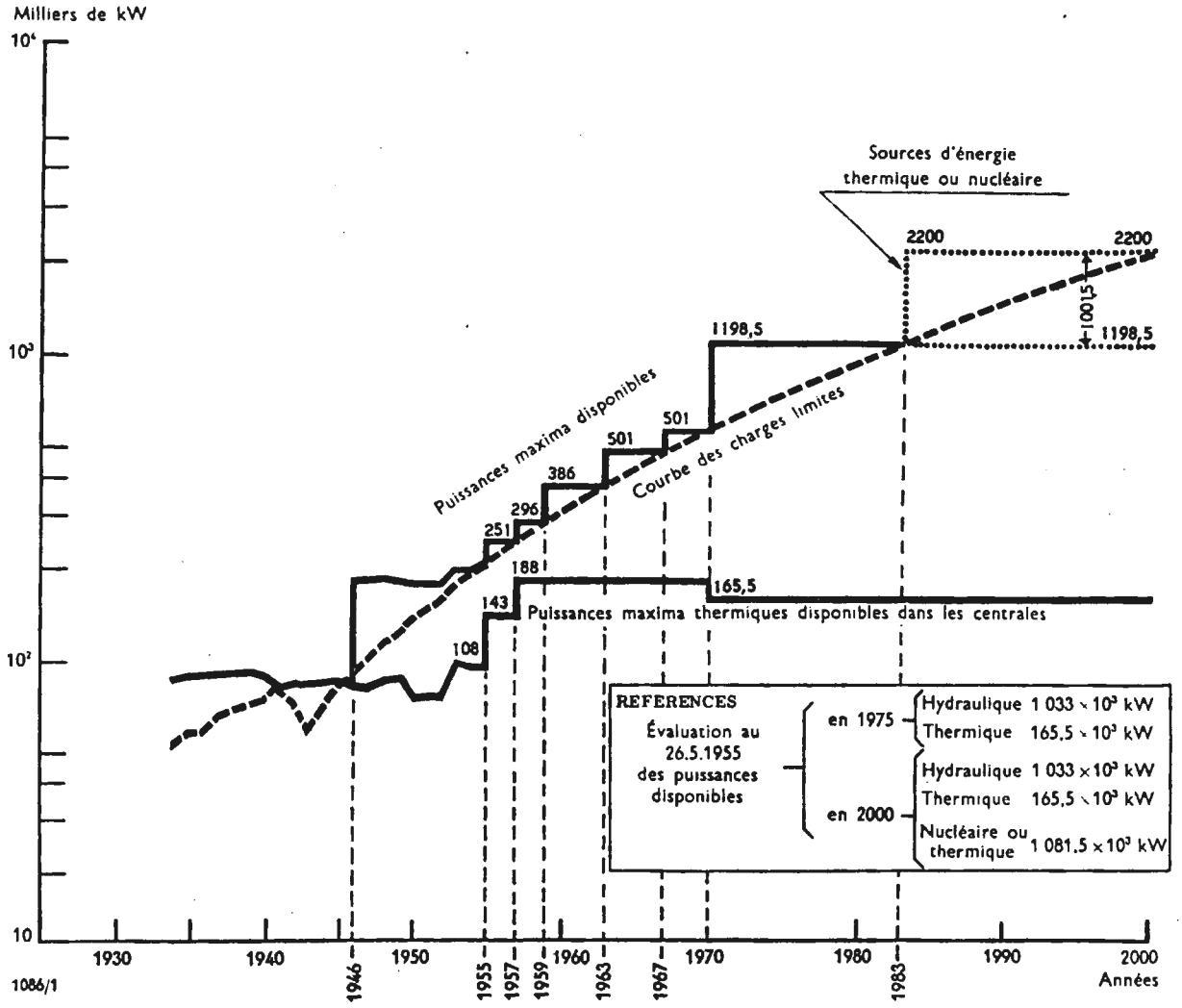


Figure 1. — Sources d'énergie électrique qui permettront de répondre aux besoins de l'Uruguay pendant les périodes 1955-1975 et 1975-2000.

La production d'énergie hydroélectrique de 1955 à 1975

Le graphique montre l'expansion future de l'exploitation des ressources hydrauliques de l'Uruguay dans le cadre du programme général de distribution d'énergie électrique.

Le programme d'exploitation des réserves hydrauliques prévoit l'installation successive des centrales hydrauliques mentionnées au tableau 2, dont la puissance disponible totalisera 1 033 000 kW.

Comme l'indique le graphique, le programme de fourniture d'énergie électrique de l'Uruguay de 1955 à 1975 est entièrement fondé sur l'exploitation des ressources hydrauliques locales. Il prévoit la construction, au cours des quinze prochaines années, de quatre centrales hydroélectriques, parmi lesquelles il convient de citer la centrale de Rincón de Baygorria, qui va incessamment être mise en chantier.

Tableau 2

Puissance disponible dans les centrales hydroélectriques dans le cas d'une exploitation intégrale des ressources hydrauliques de l'Uruguay

Centrale hydroélectrique	Puissance disponible en kW
Rincón del Bonete (Rio Negro) . .	108 000
Rincón de Baygorria (Rio Negro) .	88 000
Paso del Puerto (Rio Negro) . .	117 000
Salto Grande (Rio Uruguay, en commun avec la République Argentine, puissance totale : 1 260 000 kW)	630 000

En raison de la configuration topographique du pays, l'exploitation des ressources hydrauliques de

l'Uruguay oblige la construction d'ouvrages coûteux, de sorte que les prix de l'énergie produite sont très élevés. C'est cela même qui doit permettre à l'énergie électronucléaire de concurrencer l'énergie hydroélectrique.

Cette concurrence pourrait entraîner une réduction du programme exploitation des ressources hydrauliques, réduction qui serait liée à l'introduction de l'énergie nucléaire dans le pays au cours de la période 1955-1975.

Les ressources pétrolières de l'Uruguay et l'utilisation de l'énergie atomique

Tout dernièrement, on a relevé en Uruguay des indices de la présence de pétrole. Ces indices ont été suffisamment prometteurs pour justifier une campagne de sondages. Les travaux ont commencé en mai 1955.

Il est impossible pour le moment de prévoir quels seront les résultats de ces recherches. On peut toutefois affirmer que, même si elles étaient couronnées de succès, elles n'affecteraient pas sensiblement le programme d'alimentation de l'Uruguay en énergie électrique.

En effet, dans le cadre du programme général d'utilisation de l'énergie atomique dans le monde, la nécessité de préserver les réserves relativement faibles de pétrole se fait sentir de façon évidente. Il est donc hors de doute que l'introduction de l'énergie nucléaire ira de pair avec une réduction de l'énergie thermique, alors que le pétrole sera consommé principalement dans le secteur des transports et dans les usines qui fabriquent les dérivés du pétrole.

On peut donc présumer que si l'Uruguay dispose de ressources en pétrole, leur exploitation s'effectuera selon les critères indiqués ci-dessus. L'existence de pétrole indigène n'entraînera donc pas un accroissement sensible de la production d'énergie thermique.

II. RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES DE L'URUGUAY DE 1975 A 2000

L'énergie thermique de 1975 à 2000

On peut voir, sur le graphique, qu'entre 1970 et 1983 la puissance maximum disponible des centrales thermiques se maintiendra à une valeur constante de 165 000 kW.

Le programme d'utilisation intégrale des ressources hydrauliques du pays prévoit qu'en 1983 la charge limite atteindra 1 198 500 kW, absorbant la totalité des puissances thermique (165 000 kW) et hydraulique (1 033 000 kW).

A partir de 1983, il sera nécessaire de faire appel à de nouvelles sources d'énergie. Si les prévisions actuelles concernant l'avenir de l'énergie atomique se réalisent, on peut être certain qu'à partir de cette date, les déficits énergétiques seront comblés grâce à la production d'énergie électronucléaire.

Il est donc possible que la production d'énergie thermique reste pratiquement constante, puisque les installations actuelles resteront vraisemblablement en service jusque vers l'an 2000.

Il convient de souligner qu'en raison du prix élevé de l'installation des centrales électronucléaires, celles-ci devront fonctionner avec un facteur de charge supérieur à 50 pour cent. De 1983 à l'an 2000, la puissance installée des centrales hydroélectriques et nucléaires sera au total de 2 114 000 kW installés, soit pour l'énergie hydroélectrique 1 033 000 kW et pour l'énergie nucléaire 1 081 500 kW, contre 165 500 kW pour l'énergie thermique. Il est donc vraisemblable que l'on pourra assurer un facteur de charge élevé dans les installations hydrauliques et atomiques.

L'énergie hydroélectrique de 1975 à l'an 2000

D'après ce que nous avons dit plus haut, le plan qui vise à l'exploitation intégrale des ressources hydrauliques de l'Uruguay sera complété, en 1970, par l'aménagement des importants ouvrages hydroélectriques du Salto Grande, où les réserves hydrauliques du Rio Uruguay seront exploitées en commun avec l'Argentine.

Par conséquent, la puissance installée des centrales hydroélectriques demeurera constante de 1975 à l'an 2000, sauf s'il se produit un retard dans l'exécution du programme d'exploitation des ressources hydrauliques.

L'utilisation de l'énergie atomique en Uruguay

Il ressort des considérations qui précèdent qu'à partir de 1983 on enregistrera un déficit énergétique, qui, selon toute probabilité, pourra être résorbé grâce à la production des centrales nucléaires.

On pense que ce déficit, estimé à 1 081 500 kW, pourra être comblé par la mise en service en premier lieu de deux centrales électronucléaires de moyenne puissance (100 000 kW chacune) qui alimenteront les régions nord-est et sud-est de l'Uruguay. On installerait d'autre part, aux environs de la capitale de la République, une grande centrale nucléaire dont la puissance serait pour commencer de 300 000 kW, pour augmenter jusqu'à 600 000 kW en 1990 et 900 000 kW en 1995.

Les deux centrales de moyenne puissance par lesquelles débuterait la production d'énergie électronucléaire en Uruguay alimenteraient des régions où la densité de population est assez faible mais où se trouvent de nombreuses agglomérations urbaines et quelques centres industriels.

Le transport de l'énergie dans ces régions est coûteux en raison de leur éloignement des centrales hydroélectriques et des centrales thermiques de la capitale de la République. Aussi, l'installation de

deux centrales électronucléaires de 100 000 kW chacune permettrait-elle de fournir aux régions du nord-est et du sud-est de l'énergie électrique à un prix qui pourrait être inférieur à celui de l'énergie des centrales hydroélectriques.

L'expérience que l'on aura acquise dans l'exploitation des centrales nucléaires de puissance moyenne sera précieuse lorsqu'il s'agira de créer une grande centrale atomique près de Montevideo, qui est aujourd'hui le centre qui consomme le plus d'énergie dans le pays et semble devoir conserver cette primauté en raison du très important développement industriel prévu pour cette ville.

La région méridionale du pays proche de la capitale de la République serait alimentée en énergie nucléaire, hydroélectrique et thermique, alors que les régions septentrionale, occidentale et centrale seraient surtout alimentées en énergie hydroélectrique.

III. CONCLUSIONS

Le programme actuel d'alimentation de l'Uruguay en énergie électrique prévoit l'utilisation intégrale de toutes les ressources hydrauliques du pays et la production d'énergie thermique complémentaire.

Ce programme, qui va jusqu'en 1983, envisage la construction d'importants ouvrages hydroélectriques. L'utilisation de l'énergie atomique n'a pas été prévue dans ce programme.

Les progrès croissants qui seront réalisés dans la production de l'énergie nucléaire et les avantages économiques que présentera souvent celle-ci sur l'énergie thermique et hydroélectrique obligeront sans doute à procéder à une révision importante de ce programme afin de déterminer à quel moment il conviendra d'introduire l'énergie électronucléaire en Uruguay.

Divers facteurs contribueront à hâter l'introduction de l'énergie nucléaire dans le pays. Étant donné la configuration topographique de l'Uruguay, les ouvrages hydroélectriques sont très coûteux. Il n'est donc pas impossible que, d'ici quelques années, l'énergie nucléaire soit en mesure de concurrencer l'énergie hydroélectrique.

Dans ces conditions, on pourra justifier une réduction du programme actuel de construction d'ouvrages hydroélectriques et l'introduction de l'énergie électrique nucléaire.

Les possibilités de ressources pétrolières que laisse espérer la récente découverte de traces de pétrole n'auront pas de répercussion sensible sur le programme d'alimentation du pays en énergie électrique, car il est logique de penser que si l'on trouve du pétrole, ce dernier sera destiné de préférence à la préparation de combustibles légers réservés aux transports et à la préparation de produits chimiques dérivés du pétrole.

Les considérations qui précèdent montrent l'intérêt que présentent pour l'Uruguay les possibilités de production d'énergie électronucléaire. Il sera tenu compte de ces possibilités dans les programmes futurs d'alimentation du pays en énergie électrique.

C'est pourquoi l'Uruguay s'intéresse au premier chef à tous les renseignements concernant la conception et l'utilisation des piles nucléaires, ainsi qu'à toutes les possibilités qui pourraient s'offrir de faciliter la formation de ses techniciens dans le domaine nouveau de la physique nucléaire.

Il est fort possible que l'intérêt que l'Uruguay porte à cette question se manifeste dans un proche avenir par l'installation d'une petite pile nucléaire grâce à laquelle les techniciens et les hommes de science pourraient acquérir l'expérience et la formation qui leur seront nécessaires plus tard, lorsque l'énergie électronucléaire sera introduite dans le pays.

Cette pile, que l'on utiliserait comme une usine pilote, servirait également à la préparation d'isotopes radioactifs. Son installation constituerait l'étape préalable à la construction et à l'exploitation de piles plus puissantes.

Les besoins de la Jordanie en énergie électrique*

par K. Tukan

La production et la distribution d'énergie électrique restent toujours l'un des principaux problèmes de la Jordanie. Il s'agit pour le pays d'assurer l'exploitation des diverses centrales et d'organiser la production. Actuellement, la plupart des centrales sont exploitées par les municipalités, qui ne disposent pas des moyens suffisants pour faire face dans ce domaine à tous les besoins qu'entraîne le progrès. Certaines centrales sont exploitées par des compagnies dont deux seulement, celles d'Amman et de Jérusalem, ont obtenu des concessions; encore, la seconde est-elle en voie d'être remplacée par une compagnie qui sera formée de toutes les municipalités du district.

La force motrice est fournie dans tous les cas par des moteurs diesel; on n'a encore utilisé jusqu'ici aucune autre source d'énergie, bien qu'il soit possible de faire appel à l'énergie hydraulique dans certains centres. De plus, on pourrait recourir aux turbines à vapeur dans certains centres de consommation.

PRODUCTION ACTUELLE

Il existe en Jordanie 20 centrales seulement, toutes situées à proximité des grandes agglomérations urbaines, à l'exception de la centrale de la cimenterie. Ceci s'explique du fait que la majeure partie de l'énergie est destinée à la consommation des ménages, encore que l'on trouve quelques établissements industriels peu importants dans les

Original : anglais

* Ce mémoire est arrivé trop tard pour être distribué pendant la Conférence de Genève. Il est inclus dans le volume à titre de documentation supplémentaire pour que le tableau des besoins du monde en énergie soit aussi complet que possible.

Tableau 1

Répartition géographique des centrales électriques de Jordanie

	Puissance installée actuelle	Puissance à installer d'ici 3 ans	Besoins en énergie dans 10 ans	Population[a]
Amman	3 000	5 500	8 000	120 000
Jérusalem (région)	1 040	1 680	3 000	130 000
Nablus	—	900	2 400	64 000
Hébron	148	448	1 600	39 000
Zerqa	136	3 000	10 000	40 000
Irbed	805	900	1 500	25 000
Tulkarm	250	500	750	24 000
Salt	128	300	500	17 000
Jéricho	120	300	800	20 000
Jenin	32	130	230	14 000
Madaba	56	150	250	10 000
Mafrak	43	135	200	9 000
Kufrinja	50	150	250	7 000
Karak	67	228	400	7 000
Ma'an	65	125	215	6 000
Aqaba	100	1 000	1 500	10 000
Jarash	77	129	180	4 000
Ajlun	60	90	130	4 000
Shuneh	65	65	100	2 000
	6 242	12 720	32 000	552 000

[a] Il n'existe pas de chiffres précis de la population des différentes villes. Le dernier recensement a eu lieu en 1953. Les évaluations citées ci-dessus sont fondées sur les chiffres de 1953.

grandes villes. Il n'existe aucun chiffre indiquant séparément les besoins de l'industrie, mais l'examen sommaire des courbes de la consommation journalière dans certaines grandes villes montre que la charge diurne, que l'on peut sans difficulté considérer comme représentant les besoins de l'industrie en énergie, s'élève à près de la moitié de la charge nocturne, qui, elle, représente intégralement la consommation des ménages.

Il ressort du tableau 1 que les centrales actuelles développent une puissance de 6 242 kW. Si l'on y ajoute la puissance installée à la cimenterie de Fahais (3 000 kW), on arrive au chiffre total de 9 242 kW.

BESOINS ACTUELS

Nous tiendrons compte ici des besoins totaux qui se manifesteront dans 3 ans, une fois que toutes les machines commandées, ou que l'on envisage de commander, auront été installées et seront entrées en service. Le tableau 1 montre que la demande atteindra environ 12 730 kW. Il convient d'y ajouter

Tableau 2

Les industries et leurs besoins en énergie

Ciment	3 000 kW
Raffinerie	200
Textiles	2 000
Sucre	500
Engrais	400
Chlorure et soude caustique	1 000
Ateliers	500
Brasserie	150
Fabrique de tentes	200
Huile végétale	320
	8 270 kW

l'énergie indispensable à tous les établissements industriels qui, selon les plans, doivent entrer en service d'ici 3 à 5 ans. Les besoins des établissements (qui sont énumérés dans le tableau 2) s'élèveront à 8 270 kW environ. Étant donné qu'il ne sera peut-être pas possible de créer tous ces établissements, mais que d'autres pourraient être mis en service pendant la même période, nous pouvons accepter ce chiffre tel quel. En conséquence, la Jordanie aura peut-être besoin de 21 000 kW au terme de la période envisagée.

BESOINS FUTURS

Les évaluations des besoins en énergie dans 10 ans sont fondées sur l'hypothèse selon laquelle tous ceux qui désirent utiliser l'énergie électrique à des fins domestiques auront la possibilité de le faire, l'équipement et le financement des centrales devant permettre de satisfaire toute demande. On a estimé que la puissance installée devait être de l'ordre de 15 à 45 watts par habitant, compte tenu de nombreux facteurs, notamment la population de l'agglomération*, son accroissement et le niveau de vie de ses habitants. Le total de la puissance à installer qui figure dans la liste est de 32 000 kW. Si nous y ajoutons les chiffres de la puissance qu'il faudrait installer dans toutes les villes qui ne sont pas encore reliées à un réseau, à savoir 8 000 kW, la demande totale d'énergie destinée aux usages domestiques s'élèvera à 40 000 kW environ.

En ce qui concerne l'industrie, on croit que la demande effective peut s'élever au moins au double des estimations calculées pour les 3 ou 5 années à venir, soit à 12 000 kW. Ainsi, selon ces estimations, les besoins totaux s'élèveront à 52 000 kW dans 10 ans.

* La consommation d'énergie s'élève en moyenne à 15 kWh par an et par habitant dans la région alimentée en électricité.

Les besoins de l'Iran en énergie électrique et thermique*

TAUX DE CONSOMMATION DES DIVERS TYPES DE COMBUSTIBLES EN L'AN 1333 DU CALENDRIER IRANIEN (MARS 1954 - MARS 1955)

Le tableau 1 donne le taux de consommation annuelle, la quantité de chaleur produite, en chiffres absolus et en pourcentage, de diverses sources de chaleur qui toutes existent dans le pays, notamment les produits pétroliers, le charbon, le charbon de bois, le bois et divers produits tels que les broussailles et les plantes séchées. Le tonnage de bois indiqué dans le tableau s'entend à la fois du bois de feu et du bois utilisé pour la production de charbon de bois. La chaleur tirée des plantes séchées, etc., est exprimée par le chiffre de 2 millions de tonnes de bois, estimation calculée en équivalent de la chaleur produite.

Tableau 1

Taux de consommation des combustibles, mars 1954 - mars 1955

Source de chaleur	Quantité (en tonnes métriques)	Quantité de chaleur (en 10^{13} kcal)	Pourcentage
Produits pétroliers .	1 643 100	17,8	38
Charbon	250 000	1,5	3,2
Bois, charbon de bois, etc., et substances non minérales (en équivalent de bois).	6 000 000	27,6	58,8
		46,9	100

UTILISATION DE DIVERS TYPES DE COMBUSTIBLES

Le combustible nécessaire aux moyens de transport tels que les navires, avions, véhicules automobiles, locomotives, etc., est tiré des produits pétroliers (voir tableau 2).

De la production totale de charbon du pays, 55 pour cent sont consommés dans divers établissements industriels, tels que des cimenteries, des usines textiles et des raffineries de sucre. Cette quantité de charbon représente 1/10 des besoins de l'industrie en chaleur, les autres 9/10 devant être tirés des produits pétroliers.

Tableau 2

Taux de consommation de chaleur pour diverses utilisations

Utilisation	Quantité de chaleur (en 10^{13} kcal)	Pourcentage
Transports	6,7	14,2
Industrie et production d'électricité . .	4	8,4
Petites installations de chauffage, consommation domestique, chauffage et éclairage	36,2	77,4
Total	46,9	100

PUISSANCE INSTALLÉE DANS L'ENSEMBLE DU PAYS A LA FIN DE L'ANNÉE 1333 DU CALENDRIER IRANIEN (1954-1955)

La puissance installée, force et lumière, est de 365 000 kW. L'énergie produite par les installations existantes est 550 millions de kWh. Les chutes d'eau n'ont produit que 1 600 kW sur le total de la puissance installée.

BESOINS FUTURS EN ÉNERGIE

Le taux de consommation du charbon n'a guère augmenté au cours des dernières années en raison de l'importance limitée des gisements de charbon et du coût élevé de l'exploitation (les réserves de charbon peuvent être évaluées avec certitude à 50 millions de tonnes). La consommation de bois ne s'est pas modifiée, elle non plus, d'une part parce que les mesures prises pour la protection des forêts ont empêché la population d'abattre trop d'arbres, et d'autre part, parce que les produits pétroliers leur ont fait concurrence. Quand à la consommation des produits pétroliers au cours de l'année dernière, elle a marqué une augmentation de 17 pour cent environ, et l'on peut prévoir que l'Iran satisfera à l'accroissement futur de la demande intérieure de combustibles grâce aux produits pétroliers. Si l'on considère qu'actuellement les

Original : anglais.

* Ce mémoire est arrivé trop tard pour être distribué pendant la Conférence de Genève. Il est inclus dans le volume à titre de documentation supplémentaire pour que le tableau des besoins du monde en énergie soit aussi complet que possible.

produits pétroliers permettent de couvrir 38 pour cent de la consommation intérieure de combustibles, et que leur consommation a augmenté de 17 pour cent au cours des dernières années, on peut affirmer en toute certitude que le taux d'accroissement annuel de la consommation de chaleur a été de 7 pour cent environ.

Si donc nous supposons qu'au cours des 50 prochaines années ce taux de 7 pour cent se maintiendra en raison de l'accroissement de la population et de l'expansion de l'industrie, et que le taux de consommation des combustibles autres que les produits pétroliers restera à peu près au niveau actuel, nous pouvons conclure que dans 50 ans la demande annuelle de produits pétroliers sera de l'ordre de 116 millions de tonnes métriques environ, et que la consommation de produits pétroliers aura atteint au total 1,6 milliard de tonnes pendant la même période. Il y a lieu de noter que, selon certaines évaluations, l'importance des réserves des champs pétrolifères iraniens actuellement connus est de l'ordre de 1 milliard de tonnes, et que les réserves éventuelles, mais non reconnues, de ces champs, ont été évaluées à des chiffres allant jusqu'à 4 milliards de tonnes.

Ce qui précède, et notamment la possibilité de découvrir de nouveaux champs pétrolifères ou de déterminer de plus abondantes réserves de pétrole, montre bien qu'il faudra prévoir une nouvelle source d'énergie pour les générations futures, d'autant plus que l'Iran exporte des produits pétroliers (actuellement les exportations sont très supérieures à la consommation intérieure) et que la demande intérieure s'accroît régulièrement. Sinon, il se peut que le pays souffre d'une pénurie, avant même que cette période de 50 ans ne soit écoulée.

Il y a lieu d'ajouter en conclusion que l'Iran n'a entrepris aucune étude générale des gîtes d'uranium et de thorium et, en conséquence, il est impossible d'avancer des chiffres sur l'importance réelle des gîtes de ces substances.

Les ressources et les besoins de Ceylan en énergie*

par C. J. Eliezer

SITUATION ACTUELLE

Le tableau 1 [1] ** donne les chiffres de la capacité électrique installée à Ceylan en 1952.

Tableau 1

Capacité installée (kW)

	Énergie hydraulique	Énergie thermique		Total
		Centrales à vapeur	Moteurs diesel	
Service public des entreprises d'électricité (DGEU) .	25 300	11 500	6 000	42 800
Collectivités locales	—	—	10 000	10 000
Usines de l'État	—	—	3 600	3 600
Plantations et établissements industriels	10 000	—	77 000	87 000
TOTAL	35 300	11 500	96 600	143 400

Bien que la production totale soit plutôt faible si on la compare à celle de la plupart des pays, les fournitures d'électricité augmentent rapidement à l'heure actuelle. Entre 1948 et 1953, la production du DGEU a doublé. Les chiffres indiqués au tableau 2 font ressortir l'augmentation relative de la production d'électricité du DGEU et de la charge de pointe au cours des dernières années.

Tableau 2

Augmentation de la production d'électricité

	Énergie produite (en 10^6 kWh)	Charges de pointe (en kW)
1948-1949	57	13 400
1949-1950	66	14 000
1950-1951	82	17 000
1951-1952	98	25 000
1952-1953	115	27 400
1953-1954	130	29 800

L'expansion de la production qui s'est produite pendant cette période a été rendue possible par l'achèvement de la première phase du projet hydraulique de Laksapana.

Les chiffres dont nous disposons n'étant pas complets, il ne nous est pas facile d'évaluer la production des centrales privées exploitées par les plantations de thé, les usines de fabrication d'huile de coprah, etc. D'après une estimation approximative [1], leur production aurait atteint 156 × 10^6 kWh en 1950. Il serait donc raisonnable de chiffrer la production globale en 1954 aux alentours de 300 × 10^6 kWh.

PRODUCTION FUTURE

La mise en valeur de l'énergie hydroélectrique se poursuit activement. Ceylan manquant totalement de ressources en charbon ou en pétrole, tout le combustible nécessaire aux centrales thermiques doit être importé d'outre-mer. Si toute la production actuelle était tirée uniquement des centrales thermiques, il faudrait disposer d'environ 70 000 tonnes de combustibles. Les forces hydrauliques déjà exploitées ont permis d'épargner des devises étrangères à raison d'environ 7,5 millions de roupies chaque année [2]. D'après le programme de développement économique pour l'avenir, Ceylan fera appel dans toute la mesure du possible à l'énergie

Original : anglais.

* Ce mémoire est arrivé trop tard pour être distribué pendant la Conférence de Genève. Il est inclus dans le volume à titre de documentation supplémentaire pour que le tableau des besoins du monde en énergie soit aussi complet que possible.

** Les numéros entre crochets renvoient à la bibliographie qui figure à la fin du mémoire.

hydroélectrique pour remplacer, partout où ce sera possible, les centrales thermiques par des centrales hydrauliques, et elle s'efforcera de faire face à l'accroissement des besoins de l'industrie en expansion.

La Commission économique des Nations Unies pour l'Asie et l'Extrême-Orient a évalué à 1 million de kW la capacité potentielle de Ceylan en énergie hydroélectrique, mais d'autres l'ont chiffrée à 500 000 kW. La configuration montagneuse des régions du centre de l'île, où les sommets les plus élevés encadrent une haute pénéplaine entourée d'une seconde pénéplaine moins élevée, est favorable à l'utilisation de l'énergie hydroélectrique. Mais il y aura également des obstacles à surmonter. Les rivières n'ont pas un débit régulier, et les bassins de captation situés en amont des points se prêtant à l'installation de centrales sont de superficie plutôt réduite. Il faudra construire des bassins d'accumulation pour régulariser le débit des fleuves.

En outre, les sources d'énergie hydroélectrique se trouvent, pour la plupart, dans les régions du sud et du centre de l'île. Le transport de l'électricité sur de longues distances vers d'autres régions où sont situées certaines usines et où l'on envisage d'en créer de nouvelles dans un proche avenir, sera d'un coût prohibitif. La mise en valeur des quatorze sources d'énergie hydroélectrique les plus abondantes permettrait sans doute de produire 400 000 kW, alors que l'apport des vingt-trois sources qui viennent ensuite par ordre d'importance ne dépasserait guère 100 000 kW. A supposer que la construction des centrales ait la priorité dans les programmes de développement, les ressources disponibles en énergie hydroélectrique peuvent se chiffrer comme suit :

1965	250 000 kW
1975	400 000 kW
1985	500 000 kW

LA DEMANDE D'ÉLECTRICITÉ

A Ceylan, la production d'électricité par habitant atteignait environ 40 kWh en 1954. Ce chiffre est bas, si on le compare à celui de la plupart des régions du monde. En 1950, les chiffres de la production dans plusieurs autres pays étaient les suivants [1] : Mexique 174, Espagne 223, Italie 533, États-Unis d'Amérique 2 557, Norvège 5 251. Même lorsque le potentiel hydroélectrique sera entièrement exploité, en 1985 par exemple, la production par habitant sera encore inférieure à 100 kWh. l'île devant compter à l'époque 20 millions d'habitants. Ainsi, l'énergie hydroélectrique ne suffit pas à elle seule à permettre une élévation sensible du niveau de vie.

On s'attend que la demande d'électricité augmente constamment dans les plantations et les établissements industriels, de même que la consommation des zones rurales et des ménages.

Dans les installations où sont traités le thé et le caoutchouc, les fabriques d'huile de coprah, les moulins à riz, les mines, cimenteries, etc., la puissance installée et la production en 1952 ont été évaluées aux chiffres qui figurent dans le tableau 3.

Tableau 3

Puissance installée et production en 1952

	Puissance installée (en kW)	Production (en 10^6 kWh)
Thé	50 000	75
Caoutchouc	25 000	50
Huile	10 000	16
Riz	3 500	7
Autres	4 500	8
TOTAL	93 000	156

Ces chiffres augmenteront avec les années. L'industrie du thé sera encouragée à électrifier ses installations par la perspective des rendements accrus et des autres améliorations qui résulteront de cette modernisation. Il est fort probable que les industries de l'huile de coprah et du caoutchouc concentreront leur production en de plus grandes unités pour obtenir un meilleur rendement, et cette concentration accélérera à son tour l'électrification. On peut également supposer que, comme le fait s'est produit au Japon, l'utilisation croissante de l'électricité dans les plantations ne fera qu'étendre son utilisation dans les zones rurales et stimuler le développement des industries rurales. L'électrification des campagnes se justifiera davantage par la création de petites industries et d'industries artisanales, telles que les ateliers de poteries, les menuiseries, les forges, etc. La consommation domestique marque déjà une certaine augmentation, du fait que les sources traditionnelles d'approvisionnement en bois de chauffage utilisé pour la cuisine et le chauffage tarissent, et que le prix de ce combustible augmente dans les zones urbaines. S'il est possible de distribuer l'électricité à un prix raisonnable, il en résultera une assez forte demande pour alimenter la consommation domestique.

Outre les augmentations prévues ci-dessus, la mise en œuvre du programme de développement industriel intensif sera à l'origine d'un accroissement spécial au cours des prochaines années. On a déjà établi les plans de fabriques de soude caustique, d'engrais, de DDT, de médicaments, d'acide acétique, de papier, de sucre, d'articles en textile, et aussi d'aciéries. Certains de ces établissements sont déjà en cours de construction. Il faudra donc disposer de nouveaux approvisionnements en électricité. De plus, il aurait déjà fallu depuis longtemps électrifier certains tronçons du réseau ferroviaire, ce qui entraînera une consommation accrue d'énergie électrique.

Ces besoins pourront être partiellement couverts par l'énergie hydroélectrique, dont la mise en valeur se poursuit actuellement. Mais les fabriques qui seront construites dans des régions assez éloignées des centrales hydrauliques devront tirer leur courant de centrales thermiques. Les fabriques de D.D.T., de soude caustique et de chlore qui seront installées dans le nord de l'île, ainsi qu'une usine de traitement d'ilménite proche de Trincomalee, seront notamment dans ce cas. Comme Ceylan ne possède ni charbon ni pétrole, l'importation de ces combustibles empêchera le prix de l'électricité de baisser.

LES TARIFS

Les tarifs de vente de l'électricité produite dans les centrales thermiques sont indiqués au tableau 4 par des chiffres qui expriment les prix demandés avant la mise en service des centrales hydrauliques. Ce tableau donne les tarifs moyens dans les villes principales.

Tableau 4

Tarifs moyens

(En centièmes de roupie par kWh)

Année	Ville	*A*	*B*	*C*	*D*	*E*
1950 .	Colombo	18,8	25,4	8,7	13,6	16,29
1950 .	N'Eliya	12,7	24,4			21,83
1949 .	Kandy	25,42				33,71
1949 .	Galle	31,55	21,80			39,30
1949 .	Trincomalee	40,80	31,30			45,35
1949 .	Jaffna	31,10	18,10			44,65
1949 .	Ratnapura	41,80	19,95			39,10

A : Vente aux particuliers; *B :* Éclairage public; *C :* Traction; *D :* Tarif industriel; *E :* Total des ventes.

A titre de comparaison, nous avons reproduit dans le tableau 5 [1] les tarifs en vigueur pour trois catégories d'usagers dans trois grandes villes étrangères et à Colombo au cours de l'année 1950. Ils sont exprimés en cents des États-Unis et sont ceux qui étaient applicables respectivement aux petits consommateurs de courant lumière (15 kWh de consommation mensuelle), aux petits consommateurs industriels (6 000 kWh par mois) et aux gros consommateurs industriels (75 000 kWh par mois).

Tableau 5

Prix comparés de l'énergie

(En cents des États-Unis d'Amérique)

Ville	Lumière (15 kWh/mois)	Force industrielle (6 000 kWh/mois)	Force industrielle (Puissance : 3 000 kW; 75 000 kWh/mois)
New York	6,33	4,19	2,40
Zurich . .	8,15	2,35	1,27
Paris . . .	4,65	3,60	1,56
London . .	5,8	1,79	1,59
Colombo .	8,3	1,80	1,30

Par comparaison avec le coût général de la vie à Ceylan, ces tarifs d'électricité sont assez élevés.

RESSOURCES MINÉRALES [3]

Il est assez difficile d'évaluer dans quelle mesure les ressources minérales de Ceylan trouveraient d'utiles applications dans l'industrie de l'énergie nucléaire. On trouve de la monazite et du zircon avec de l'ilménite sur les plages de sable qui bordent la côte en certains endroits. Ces minéraux ne sont actuellement exploités ni en vue d'une utilisation locale ni pour l'exportation. Les vastes gisements d'ilménite situés au voisinage du Trincomalee, riches d'environ 4 millions de tonnes, ont une teneur en zircon d'environ 8 pour cent mais ne contiennent pas de monazite. A Induruwa, sur la côte sud-ouest, les gisements contiennent en moyenne 15 pour cent de monazite. Entre 1918 et 1922, on a traité plus de 3 000 tonnes de sable noir, mais l'entreprise fut abandonnée lorsque le prix de la monazite tomba. La monazite de Ceylan contient en moyenne 10 pour cent environ de sels de thorium, qui ressemble à la monazite de Travancore.

Dans la région de Bambarabotuwa, à Ceylan, on rencontre un minéral appelé thorionite, qui se compose essentiellement des oxydes d'uranium et de thorium. Entre 1904 et 1908, 9 tonnes environ de ce minéral ont été exportées, mais les gîtes ont été rapidement épuisés. Des recherches récentes ont montré qu'il en existe encore des quantités limitées, aussi bien dans les régions autrefois exploitées que dans d'autres qui ne l'ont pas encore été. Un échantillon de thorionite provenant de cette région a donné à l'analyse les résultats suivants : U_3O_8, 28,5 pour cent, ThO_2, 62,6 pour cent. Des recherches plus approfondies seront nécessaires pour que l'on puisse évaluer les possibilités d'utiliser tel ou tel de ces minéraux dans l'industrie nucléaire à des conditions économiques.

LES POSSIBILITÉS DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DE SOURCE NUCLÉAIRE

En raison des circonstances qui ont déjà été exposées aux paragraphes précédents, les possibilités d'approvisionnement en énergie hydroélectrique sont limitées et n'existent que dans certaines régions de l'île; quant au combustible qui alimenterait les centrales thermiques, il doit être importé de l'étranger, ce qui augmente le prix de l'électricité. Aussi est-il nécessaire d'examiner très sérieusement les possibilités de l'énergie électrique de source nucléaire. Il serait souhaitable que des techniciens ceylanais reçoivent une formation dans les centres de recherche atomique, en vue de s'initier aux techniques d'utilisation des radioisotopes en médecine, en agriculture et dans l'industrie, et aux principes du fonctionnement des piles. Il conviendrait ensuite de construire à Ceylan une petite centrale nucléaire qui permettrait aux techniciens du pays de se familiariser avec les divers problèmes

rencontrés dans le fonctionnement des piles et d'acquérir les connaissances nécessaires en la matière, et qui approvisionnerait en isotopes radioactifs les hôpitaux et les établissements de recherche médicale et agricole. On pourra par la suite examiner sérieusement la possibilité de construire de puissantes centrales nucléaires, et une évaluation bien fondée des divers facteurs économiques permettra d'établir des comparaisons avec les centrales de type classique.

BIBLIOGRAPHIE

1. World Bank Mission Report, 1952.
2. Government Six Year Plan, 1955.
3. Fernando L. J. D., Bulletin of the Imperial Institute, 1948.

Les besoins de la Syrie en énergie électrique *

ÉVOLUTION DES BESOINS PENDANT LES DIX DERNIÈRES ANNÉES

En Syrie, l'électricité n'a connu son vrai développement qu'après la dernière guerre. Jusqu'en 1939, les sociétés concessionnaires d'électricité avaient d'importantes réserves, rarement utilisées. Pendant la guerre, la consommation a augmenté largement sans que ces sociétés aient pu agrandir leurs moyens de production, de sorte qu'au lendemain de la guerre, elles ont eu à faire face à une grosse demande d'énergie avec les mêmes moyens qu'en 1939.

La situation a donc changé énormément à partir de 1945. La demande d'énergie électrique subit une ascension brusque épuisante et déborda rapidement les moyens de production des sociétés, mettant celles-ci dans la nécessité impérieuse de s'équiper rapidement pour faire face à la demande et pour la devancer.

Suivant l'exemple de la plupart des pays d'Europe, après la guerre, les sociétés d'électricité en Syrie ont donc eu à faire face brusquement à un accroissement de consommation suivant une allure très accélérée devant laquelle elles étaient impuissantes. La course était désormais ouverte entre l'extension de l'équipement des centrales, freinée par la paralysie de l'industrie électrique en Europe, elle-même en difficulté, et les besoins en énergie électrique augmentant sans cesse à une vitesse incroyable.

La première manche de cette course fut perdue par les sociétés productrices, qui, faute de capitaux suffisants et faute de trouver un matériel livrable rapidement, n'ont pu disposer à temps de moyens de production capables de satisfaire la demande. C'est ainsi que l'on a dû, par exemple, équiper certaines centrales de groupes diesel de types et de marques très divers; chaque fois qu'un nouveau groupe était installé et mis en service, sa production était consommée immédiatement, quand elle n'était pas déjà inférieure aux besoins du moment, étant donné l'énorme retard apporté à la livraison du groupe.

L'accroissement de la production depuis 1945 a donc été freiné d'une façon très sensible par les coupures systématiques ou hebdomadaires de courant et par les retards systématiques apportés à brancher de nouveaux clients ou à augmenter la puissance des installations des anciens abonnés, ainsi que par les restrictions imposées à l'éclairage et à l'industrie aux heures de pointe.

Le tableau 1 montre les chiffres de production électrique annuelle des deux plus grandes villes de Syrie, de 1945 à 1953, en millions de kilowattheures :

Tableau 1

Année	Production de Damas	Production d'Alep
1945	16,2	13,1
1946	18,4	16,3
1947	20,0	19,6
1948	26,3	21,2
1949	31,0	25,7
1950	35,2	33,5
1951	37,0	36,4
1952	40,2	43,0
1953	47,5	49,0

L'accroissement de la consommation après la guerre, freiné pendant la guerre par le black-out, est dû aux raisons principales suivantes : 1° développement de l'artisanat utilisant l'énergie électrique; 2° naissance d'un très grand nombre de petites industries; 3° extension de l'urbanisme : apparition de beaucoup de quartiers nouveaux et de grands immeubles, surtout à Damas et à Alep; 4° augmentation de la consommation spécifique de l'individu par suite de l'élévation du standing de vie du citoyen : meilleur éclairage, usage presque universel de la radio et du fer à repasser électrique, et généralisation des ustensiles ménagers électriques dans les milieux bourgeois, tels que frigidaires, radiateurs, ventilateurs, machines à laver, cuisinières ou réchauds électriques.

C'est pourquoi les grandes sociétés industrielles, qui sont nées avant ou après la guerre, ont dû produire leur énergie électrique par leurs propres moyens (cimenteries, filatures et tissages, verreries, installations frigorifiques); leur production est importante et croît sans cesse.

A la fin de l'année 1954 la puissance installée en Syrie a atteint 69 000 kilowatts, et l'énergie produite pendant l'année 1954 s'est élevée à 235 millions de kWh.

Ce dernier chiffre, rapporté au nombre d'habitants de la Syrie, donne environ 65 kWh par habitant et par an, chiffre assez bas, d'autant plus que la majorité de la campagne syrienne n'est pas encore électrifiée.

Original : anglais.

* Ce mémoire est arrivé trop tard pour être distribué pendant la Conférence de Genève. Il est inclus dans le volume à titre de documentation supplémentaire pour que le tableau des besoins du monde en énergie soit aussi complet que possible.

L'évolution actuelle de la production montre que le dédoublement qui se produit ordinairement dans les pays industrialisés en 10 ans, se produira en Syrie en 6 ans, pour la période actuelle. On peut dire que la puissance électrique installée fin 1960 et la production cette année seront respectivement de 138 000 kilowatts et 470 millions de kWh.

Pendant les décennies qui suivront, nous estimons les coefficients d'accroissement aux valeurs indiquées au tableau 2.

Tableau 2

Accroissement de la production d'énergie électrique

Période	Taux d'augmentation de la production (en pour cent)	Production annuelle totale à la fin de la décade (en millions de kWh)
1954-1960 . . .	2,0	470
1961-1970 . . .	2,7	1 270
1971-1980 . . .	2,5	3 180
1981-1990 . . .	2,2	7 000
1991-2000 . . .	2,0	14 000

Il est clair que l'incertitude dans les chiffres ainsi obtenus, va en augmentant au fur et à mesure qu'on avance dans le temps. De toute façon, nous ne croyons pas que ces chiffres seront au-dessus de la vérité.

D'après les estimations actuelles, les puissances installées seront: actuellement, 69 000 kW; fin 1960, 138 000 kW; fin 1970, 300 000 kW; fin 1980, 600 000 kW; fin 1990, 1 200 000 kW; fin 2000, 2 400 000 kW.

RESSOURCES EN ÉNERGIE EXISTANT ACTUELLEMENT EN SYRIE

La Syrie est pauvre en ressources d'énergie : peu de cours d'eau, pas de houille, pas de pétrole pour le moment.

Ressources hydrauliques

Sur les 69 MW installés actuellement, 5 seulement sont hydrauliques et les 64 MW autres sont thermiques. Le combustible pour la production d'énergie électrique est importé.

En 1956, le chiffre de la puissance hydroélectrique sera porté à 11,3 MW, et l'on estime que la puissance hydroélectrique totale que peuvent donner les cours d'eau syriens ne dépasse pas 150 MW.

La Syrie pense sérieusement à étendre la production hydroélectrique dans toute la mesure du possible.

Mais cet aménagement des cours d'eau ne peut pas, le plus souvent, être considéré du seul point de vue de la production électrique. D'autres impératifs entrent en ligne de compte, qui souvent viennent entraver les possibilités énergétiques. La navigabilité fluviale est l'un d'eux, mais en Syrie c'est surtout le problème vital de l'irrigation qui domine. C'est que la pluviosité y est très faible et les cours d'eau très rares; le développement d'une irrigation rationnelle pourrait revaloriser d'importants territoires.

En dépit de cela, et même pour ces raisons, les projets d'aménagement hydroélectriques en Syrie occupent une bonne part de l'activité des diverses administrations intéressées.

Ressources en combustibles

En Syrie, il n'y a pas de houille; et il semble jusqu'à maintenant qu'il n'y a pas de pétrole non plus. Quoique la Syrie soit entourée de champs pétrolifères, les prospections qui y ont été faites n'ont encore rien révélé; on ne désespère cependant pas de trouver du pétrole un jour prochain. En attendant, la Syrie importe tous les combustibles qu'elle consomme des raffineries de pétrole de Tripoli et de Sidon (Liban).

En 1954, la Syrie a consommé 335 000 tonnes de gas-oil et fuel-oil, dont 30 000 tonnes pour produire l'électricité. Ce chiffre augmente très vite par suite du développement industriel.

Malgré les grandes possibilités en pétrole des pays voisins : Irak, Arabie saoudite, Bahrein, etc., la Syrie éprouve pas mal de difficultés à s'approvisionner.

Énergie éolienne

Il reste à la Syrie la ressource d'utiliser l'*énergie éolienne*. En faisant appel aux spécialistes qui se sont attaqués avec succès à ce problème, dans divers pays du monde, on pourrait construire une centrale d'essai, qui, si elle s'avère bonne, servirait de modèle pour les grandes centrales futures. Tout l'Est syrien peut être développé et irrigué grâce à l'usage intelligent de ces éoliennes.

Parallèlement, il faudrait suivre de près les recherches entreprises dans plusieurs pays en vue de l'utilisation de l'énergie radiante et calorifique du soleil. Le jour où l'on aura trouvé une solution pratique pour l'utilisation de cette énergie énorme, en la transformant directement en énergie électrique, la Syrie aura à sa disposition une source inépuisable, et disponible pendant la plus grande partie de l'année.

Énergie nucléaire

Les piles atomiques seront, dans un avenir plus ou moins proche, une source d'énergie quasi inépuisable. La Syrie se doit de s'y intéresser et de donner aux recherches nucléaires l'importance primordiale qu'elles méritent. La pauvreté du pays en cours d'eau et en combustibles donne à l'énergie nucléaire une place immédiate et prépondérante dans les années à venir. Un point important est à résoudre, c'est celui de la prospection des minerais des éléments fissiles.

La Syrie compte beaucoup sur la première Conférence atomique actuelle, qui constituera une date dans l'histoire de l'humanité.

CONCLUSION

Les besoins de la Syrie en énergie électrique sont, on l'a vu, bien au-delà des possibilités de ses ressources en énergie. Nous estimons que vers l'année 1965, c'est-à-dire dans dix ans, la puissance installée en Syrie sera de 220 MW, dont une cinquantaine d'origine hydraulique, les 170 MW restant devant être thermiques; à partir de ce moment, la Syrie devra chercher sérieusement d'autres ressources que les combustibles ordinaires.

Compte rendu de la séance 2

Lundi 8 août 1955 (après-midi)

Président : M. I. I. Rabi (États-Unis d'Amérique)

Secrétaires scientifiques : MM. D. J. Dewar, A. Salam et P. Sevette

PROGRAMME

2.1. — Études générales sur l'estimation des besoins énergétiques mondiaux dans les cinquante années à venir : autres possibilités de production d'énergie.

P/902	Besoins du monde en énergie en 1975 et en l'an 2000 . .	Département des affaires économiques et sociales, ONU
P/326	Estimation des besoins en énergie	P. Ailleret
P/757	Le monde a besoin d'une nouvelle source d'énergie . . .	E. A. G. Robinson et G. H. Daniel
P/802	Besoins en énergie et développement économique . . .	E. S. Mason *et al.*
	Discussion	

2.2. — Besoins et ressources des différents pays dans les domaines énergétique et thermique

P/1116	L'énergie nucléaire dans le bilan énergétique mondial futur	Département des affaires économiques et sociales, ONU
P/868	Le rôle de l'énergie atomique en Inde et ses possibilités dans l'immédiat	H. J. Bhabha
P/125	Le plan brésilien d'électrification et les possibilités offertes par l'énergie atomique	E. Motta Rezende
P/962	Les besoins et les possibilités de production d'énergie en Yougoslavie	A. Blažek *et al.*
P/987	L'énergie électrique en Australie de 1955 à 2004	Commonwealth Department of National Development, Australie
P/949	Évolution probable des besoins d'énergie en Belgique et rôle que pourra jouer l'énergie nucléaire	R. van Mele
P/799	Perspectives de développement de la production d'énergie dans la République tchécoslovaque et importance de l'énergie nucléaire utilisée à des fins pacifiques	A. Ševčík
P/1060	L'utilisation de l'énergie au Japon : le présent et l'avenir	K. Aki
P/998	Besoins et ressources de la République Argentine en énergie électrique et thermique	G. Mendivelzúa
	Discussion	

Le PRÉSIDENT : Messieurs les délégués à la Conférence internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques, c'est pour moi un grand honneur que de présider la première séance de travail de cette Conférence historique.

On a beaucoup parlé de l'Année atomique; c'est ici, à Genève, au cours des deux semaines qui vont s'écouler, que l'expression « Année atomique » promet de devenir plus qu'une figure de rhétorique. Dans ces salles de conférence, les nations du monde vont s'attaquer à la difficile tâche de mettre l'atome au service de l'humanité. La première séance de travail doit être consacrée à déterminer les problèmes qui se posent à nous tous en ce qui concerne les besoins mondiaux en énergie. Elle est destinée à fournir un cadre aux séances d'intérêt général qui auront lieu ces prochains jours, et elle doit traiter de questions telles que les aspects économiques de l'énergie nucléaire et les problèmes connexes de nature juridique, administrative et sociale, que soulève l'utilisation de l'énergie nucléaire. Lorsque nous aurons recueilli ces renseignements, nous pourrons nous mettre à examiner les questions spécifiquement techniques posées par l'énergie nucléaire, ainsi que ses aspects connexes dans le domaine biologique et médical.

Cet après-midi, nous commencerons par examiner les évaluations des besoins mondiaux en énergie pour les cinquante années à venir. Après une brève discussion générale sur ce sujet, nous en viendrons à étudier les mémoires concernant les besoins de divers pays et leurs ressources. Je ne voudrais pas ouvrir l'examen du premier mémoire sans avoir essayé, une fois de plus, d'exprimer l'immensité de la tâche devant laquelle nous sommes placés. Nous sommes ici pour préparer un monde meilleur. Nous sommes venus en qualité de savants ou d'ingénieurs, et nous sommes bien équipés pour atteindre cet objectif. Jamais occasion plus favorable ne s'est offerte à une collectivité d'hommes ou à une association de nations. Mettons-nous donc au travail; mais, auparavant, le Secrétaire général de la Conférence va présenter quelques observations.

Le SECRÉTAIRE GÉNÉRAL DE LA CONFÉRENCE : Je vous remercie, M. le Président. Au début de cette première séance de travail, je tiens à présenter quelques commentaires qui seront valables pour toute la durée de la Conférence. En vous reportant au programme, vous constaterez que notre emploi du temps est très chargé. Il en résulte que nous devons commencer à l'heure, encore qu'à la présente séance nombre de personnes puissent arriver en retard. Il ne nous sera possible de respecter notre emploi du temps que si nos séances commencent à l'heure indiquée, c'est-à-dire à 14 h. 30 pour les séances de l'après-midi et à 9 heures pour les séances du matin.

Je veux dire un mot à propos des discussions. Le programme ne permet pas de leur consacrer beaucoup de temps; pour être efficaces, il faut donc qu'elles soient bien organisées. Nous avons préparé un formulaire pour les personnes qui désirent poser des questions; je pense que ce formulaire a déjà été remis aux délégations, et on peut également se le procurer auprès de nos secrétaires scientifiques. Toute personne peut ainsi nous aviser à l'avance lorsqu'elle désire présenter une observation ou poser une question lors d'une séance. Le Président de chaque séance serait grandement aidé dans la conduite des débats si ces formules pouvaient être remises aux secrétaires scientifiques dès avant la séance. Le Président est appelé, en définitive, à faire un choix parmi les questions qui pourront être posées dans le temps limité dont on disposera. Ceci ne veut pas dire qu'il ne pourra pas être posé de questions au cours d'une séance — des questions pourront être communiquées en cours de séance au secrétaire scientifique compétent — mais il est préférable qu'elles soient déposées avant la séance.

J'appelle votre attention sur le fait que des microphones de salle sont à la disposition des personnes à qui le Président donnera la parole pour qu'elles présentent leurs observations. Lorsqu'une personne a l'intention de prendre la parole, il serait préférable qu'elle prenne place à portée d'un de ces microphones de salle. Les orateurs inscrits au programme d'une séance devront s'asseoir aux premiers rangs.

Je vous rappelle également que nous avons mis à la disposition des délégués des insignes qui portent leur nom et qui sont surtout destinés à favoriser les contacts personnels et les entretiens privés après les séances. En effet, il ne sera pas possible de discuter, au cours d'une séance, tous les points qui pourraient présenter un intérêt.

En général, le Président ne présentera pas longuement les orateurs, comme on le fait parfois; en effet, le temps dont nous disposons pour nos réunions est trop limité pour cela.

Enfin, j'attire particulièrement votre attention sur les trois pages du programme imprimé, pages 144 à 146, intitulées « Instructions à l'usage des orateurs ».

ÉTUDES GÉNÉRALES SUR L'ESTIMATION DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES MONDIAUX DANS LES CINQUANTE ANNÉES A VENIR : AUTRES POSSIBILITÉS DE PRODUCTION D'ÉNERGIE

M. GUYOL (Organisation des Nations Unies) présente comme suit le mémoire P/902 : La seule chose que l'on sache avec une assez grande certitude au sujet des besoins du monde en énergie en 1975 et en l'an 2000 est que ceux-ci seront alors plus élevés qu'aujourd'hui. Nos évaluations montrent qu'ils dépasseront même de beaucoup les besoins actuels; elles prévoient que la consommation d'énergie utile par habitant aura doublé en 1975 et quadruplé en l'an 2000. Ces évaluations ne représentent, à notre avis, ni un minimum ni un maximum, mais

le niveau le plus probable qu'atteindront les besoins d'énergie dans les années à venir. Elles reposent sur l'hypothèse qu'il ne se produira ni guerre importante ni bouleversement économique au cours des cinquante prochaines années. S'il devait y avoir des guerres ou des crises telles que celles qui ont marqué la première moitié de ce siècle, les besoins énergétiques seraient, presque certainement, inférieurs à nos évaluations. Si, en revanche, l'esprit de coopération économique internationale vient à prévaloir, les besoins mondiaux en énergie pourraient largement dépasser nos évaluations. Notre étude envisage en premier lieu la situation actuelle des ressources en énergie dans le monde, compte tenu des quantités d'énergie utilisée, des sources dont elles proviennent et de l'utilisation qui leur est donnée. En second lieu, nous examinons les taux de variation de l'utilisation de l'énergie et les facteurs qui influent sur cette utilisation. Enfin, nous appliquons ces taux de variation à la situation actuelle des ressources en énergie afin de déterminer l'ordre de grandeur probable des besoins du monde en énergie dans l'avenir.

L'unité de mesure utilisée aux fins de cette étude est l'équivalent d'un mégawattheure d'énergie électrique (c'est-à-dire 1 000 kilowattheures). Ce choix a été guidé par deux raisons : d'abord, les unités électriques sont les seules à être entièrement uniformisées et universellement adoptées; ensuite, l'ordre de grandeur d'un mégawattheure répond le mieux aux besoins d'une telle étude. Du reste, il semble que le mégawattheure soit l'unité la mieux adaptée aux besoins de la présente Conférence.

Ceux d'entre vous qui ont sous les yeux le mémoire P/902 pourront se reporter au diagramme intitulé « Origine et utilisation de l'énergie mondiale en 1952 ». Nous avons tenu compte, pour établir ce diagramme, de la totalité de l'énergie soumise au contrôle de l'homme, qu'il s'agisse de l'énergie animale, de l'énergie tirée des combustibles minéraux ou végétaux, ou de l'énergie hydroélectrique; toutes ces quantités d'énergie ont été reportées sur le diagramme, de leur origine jusqu'à leur utilisation finale pour l'année 1952, année la plus récente pour laquelle il a été possible de réunir les données nécessaires. Les zones en pointillé représentent la chaleur; les zones en noir représentent l'énergie; les chiffres représentent des milliards de mégawattheures (équivalent électrique). A titre d'indication, un milliard de mégawattheures correspond environ à l'énergie électrique qui a été produite dans le monde en 1952. Les équivalents du mégawattheure en énergie et en combustible ont été indiqués en haut et à gauche du diagramme. La production de combustibles et d'énergie en 1952 est indiquée à gauche du diagramme. La production totale d'énergie a été de 29 milliards de mégawattheures. On n'a pas entièrement tiré parti de cette énergie pour des travaux utiles; une partie a servi à la fabrication de produits non combustibles, tandis que des quantités importantes se sont dissipées au cours de la production de combustibles dérivés et d'énergie électrique d'origine thermique, et que des quantités considérables ont disparu sous forme de déperdition de chaleur en cours d'utilisation.

Dans l'ensemble, deux tiers de l'énergie indiquée à gauche du diagramme se sont dissipés d'une façon ou d'une autre entre la production et l'utilisation. L'utilisation effective n'a porté que sur 10 milliards de mégawattheures. La répartition de l'énergie utile est indiquée à droite du diagramme, premièrement selon les fins auxquelles elle a été utilisée — agriculture, transport, industrie et besoins ménagers — et, deuxièmement, selon des formes sous lesquelles elle a été utilisée — énergie propulsive, énergie stationnaire, chaleur.

On n'a pas indiqué dans ce diagramme les rapports entre les diverses sources et les diverses utilisations de l'énergie; ces rapports, en effet, sont déterminés beaucoup plus par des avantages d'ordre économique que par des nécessités matérielles. La plus grande partie des besoins en chaleur et en énergie qui sont indiqués ici a été satisfaite, ou aurait pu être satisfaite, à partir de l'une ou l'autre des sources d'énergie disponibles, soit directement, soit après conversion en électricité dans des centrales thermiques.

J'aimerais attirer spécialement votre attention sur la partie droite du diagramme qui, pour la première fois, présente un tableau des besoins en énergie qui est conforme à la réalité. Les grandes quantités d'énergie qui ont été consommées, telles qu'elles apparaissent sur la gauche, reflètent un manque d'efficacité dans la conversion et l'utilisation des combustibles. Les quantités de combustible utilisées pour produire cette énergie auraient pu être beaucoup plus fortes ou, au contraire, plus faibles si l'on avait employé soit des mélanges combustibles différents, soit d'autres machines alimentées par ces combustibles.

Il est impossible de prévoir les variations globales du rendement des combustibles qui pourront se produire entre l'époque actuelle et la fin de ce siècle. Nous savons peu de chose du rendement qui pourra être atteint avec les combustibles nucléaires et nous ne connaissons pas la composition des mélanges combustibles qui seront utilisés dans l'avenir. Aussi les chiffres portés à droite du diagramme, qui représentent l'énergie effectivement utilisée, doivent-ils servir de données de base pour évaluer les besoins futurs en énergie. Pour utiliser ces données de base, il est nécessaire de déterminer les taux probables de variation des besoins en énergie pour différents secteurs de l'économie. Les méthodes usuelles servant à mesurer ces taux de variation ne peuvent être utilisées ici, car nous ne possédons, pour les années antérieures, aucune donnée comparable à celles qui sont disponibles pour l'année 1952 en ce qui concerne l'utilisation de l'énergie. Il est donc nécessaire de déterminer ces taux de façon indirecte, soit en procédant par déduction d'après ce que nous savons du passé, soit en effectuant une analyse quelque peu subjective.

Je ne vous ferai pas un exposé détaillé de la façon dont ces taux ont été obtenus, et je ne décrirai que les principaux critères qui ont été appliqués et les conclusions auxquelles nous sommes parvenus. Toutes ces évaluations reposent sur une seule hypothèse, à savoir que les besoins en énergie augmentent ou diminuent, pour chaque secteur de l'économie, de façon très semblable au niveau de l'activité dans ce même secteur. Cette hypothèse se fonde sur la relation physique entre le travail accompli et l'énergie utilement consommée, ainsi que sur la relation statistique — démontrée par de nombreux auteurs — entre la consommation d'énergie et le produit national brut. Aux fins de cette étude, cette hypothèse signifie qu'une fois que le taux d'accroissement aura été déterminé pour un secteur donné de l'économie, ce même taux pourra être appliqué à la croissance des besoins en énergie dudit secteur.

Pour le secteur industriel, on a déterminé un taux de 5 pour cent, en grande partie d'après l'indice de la production industrielle dans le monde pour les 80 dernières années, en tenant bien compte cependant de l'effet des guerres et des crises au cours de cette période. Pour les transports, on est arrivé au même taux de 5 pour cent après avoir procédé à des comparaisons assez sommaires entre les taux d'accroissement relatifs de l'industrie et des transports aux États-Unis d'Amérique et dans l'ensemble du monde. Pour l'agriculture, nous avons adopté un taux de 2 pour cent par an en nous fondant non pas sur des données prises dans le passé, mais sur le fait que ce taux devra absolument être atteint pour que la production agricole puisse augmenter au même rythme que la population mondiale et qu'il se produise même de modestes améliorations du niveau de la consommation. A cet égard, nous avons supposé que le taux d'accroissement de la population serait de 1,5 pour cent par an pendant la période considérée.

Le taux d'accroissement des besoins en énergie thermique dans le secteur ménager a également été établi à 2 pour cent par an, compte tenu principalement de l'accroissement de la population et, secondairement, de l'élévation des niveaux de vie. Par ailleurs, on a adopté un taux d'accroissement de 6 pour cent par an en ce qui concerne les besoins domestiques en énergie et en force motrice; ce taux est moins élevé que celui qui a été atteint dans certains pays au cours des dernières années, mais il semble représenter le maximum auquel il y ait lieu de s'attendre, étant donné que nous le supposons constant au cours de toute la période considérée.

En calculant ces taux, nous avons vérifié chacun d'eux pour voir s'il était compatible avec les niveaux réels courants d'utilisation de l'énergie par habitant aux États-Unis d'Amérique. Nous avons également vérifié la valeur de ces taux pris collectivement en utilisant un procédé assez indirect, lequel a consisté à mettre les résultats que nous avions obtenus en regard des taux d'accroissement de la production mondiale d'énergie entre 1860 et 1953.

En appliquant les taux d'accroissement précités, calculés pour chaque secteur de l'économie, aux chiffres de la consommation utile d'énergie dans ces mêmes secteurs en 1952, on obtient l'évaluation suivante des besoins mondiaux en énergie. Ceux-ci passeraient de 10 milliards de mégawattheures d'énergie utile en 1952 à 27 milliards en 1975 et 84 milliards en l'an 2000. Par conséquent, la consommation par habitant, qui était en moyenne de 4 mégawattheures d'énergie utile en 1952, atteindrait 8 mégawattheures en 1975 et 17 mégawattheures en l'an 2000.

Pour déduire de ces chiffres une répartition des besoins selon les différentes sources d'énergie — classiques ou nucléaire — il est nécessaire d'examiner quelles seront les quantités probables d'énergie demandées sous telle ou telle forme.

Dans le cas de l'électricité, ou de l'énergie stationnaire, nos évaluations indiquent que les besoins passeront de 1 milliard de mégawattheures en 1952 à 5 milliards en 1975 et 19 milliards en l'an 2000. Les besoins en énergie propulsive — c'est-à-dire l'énergie utilisée pour les transports et l'agriculture — qui étaient de 800 millions de mégawattheures d'énergie utile en 1952, atteindront sans doute 3 milliards de mégawattheures en 1975 et 9 milliards en l'an 2000. Les besoins en énergie thermique passeront probablement de 8 milliards de mégawattheures en 1952 à 19 milliards en 1975 et 56 milliards en l'an 2000.

Le choix des sources d'énergie appelées à satisfaire ces besoins dépendra, dans une large mesure, des disponibilités relatives, d'ordre technique et économique, de ces différentes sources. Il est presque certain qu'une petite partie des besoins thermiques sera satisfaite à partir du coke métallurgique, étant donné que ce combustible est utilisé comme agent réducteur en même temps qu'il est une source d'énergie. La plus grande partie de l'énergie propulsive exigée par les transports et l'agriculture sera probablement obtenue à partir des produits de la distillation du pétrole, surtout si l'évolution récente qui s'est manifestée dans l'utilisation de ces combustibles se poursuit. Cependant, la plus grande partie de l'énergie thermique et la totalité de l'électricité dont on aura besoin en 1975 et en l'an 2000 pourra être obtenue à partir de toutes les sources d'énergie, quelles qu'elles soient, qui seront alors disponibles.

Si, au cours du prochain demi-siècle, la science nucléaire s'oriente uniquement vers la production d'énergie électrique, l'énergie d'origine nucléaire ne pourra satisfaire qu'un cinquième, au maximum, des besoins mondiaux en énergie en l'an 2000. Si, au contraire, cette nouvelle branche de la science s'oriente tant vers la production de chaleur à bon marché que vers la production d'énergie électrique, les combustibles nucléaires pourront fournir jusqu'aux trois quarts des 84 milliards de mégawatt-

heures dont, selon nous, le monde aura besoin en l'an 2000.

M. AILLERET (France) présente comme suit le mémoire P/326 : La lecture des rapports déjà distribués m'amène à insister sur une idée développée dans mon rapport écrit, à savoir qu'il est vain de rechercher une commune mesure de la valeur économique des différentes formes d'énergie et qu'une situation énergétique ne peut pas être résumée en un seul chiffre. Par exemple, M. Guyol, qui vient de parler avant moi, a donné des chiffres qui totalisent des tonnes de charbon et des kilowattheures hydroélectriques d'après leur équivalent physique du premier principe de conservation de l'énergie. Au contraire, dans le rapport de M. Robinson qui va parler après moi, un kilowattheure hydroélectrique a été considéré comme actuellement équivalent à quatre fois plus, parce que M. Robinson considère à juste titre que ce kilowattheure hydraulique est susceptible de remplacer cette quantité de charbon dans une production d'énergie électrique.

On ne peut pas dire que l'un de ces points de vue soit juste et l'autre faux. Ce sont seulement deux aspects de la réalité économique. Les différentes formes d'énergie peuvent être caractérisées soit au point de vue de leur aptitude à fournir de la chaleur par combustion ou par dégradation, soit au point de vue de leur aptitude à fournir de l'énergie mécanique ou électrique. Il faut renoncer à donner une seule dimension économique à l'énergie.

Ceci réagit sur les taux de croissance. C'est ainsi que si l'on considère la cadence de développement de toutes les formes primaires d'énergie dans le monde, en dehors des périodes trop troublées, on arrive à un taux de 4 à 5 pour cent pour la progression de la chaleur qui aurait pu être produite par l'ensemble de ces énergies primaires si on les avait toutes appelées à produire de la chaleur par combustion ou dégradation. On trouve au contraire 7 à 9 pour cent par an, soit près du double, comme cadence de l'accroissement des énergies mécanique ou électrique qui aurait pu être produites si toutes ces énergies primaires avaient été appelées à produire de l'électricité.

Il faut donc bien analyser les usages séparément, comme l'a fait très heureusement M. Guyol, et il ne faut pas non plus essayer de se raccorder de nouveau à la conception physique de l'énergie en caractérisant la valeur d'usage par l'énergie physique finale réellement utile.

Dans l'éclairage, par exemple, l'énergie physique utile est insignifiante et ne caractérise pas la valeur économique des kilowattheures consacrés à l'éclairage. C'est encore plus évident dans le cas de l'énergie consacrée aux transports dans un pays plat où il est bien évident que l'énergie physique utile finale est nulle.

Mais sans aller jusqu'à l'usage vraiment final, il est certain que l'évolution des rendements affectera très sensiblement nos besoins en énergie primaire. Il suffirait, par exemple, qu'une partie du chauffage soit faite, un jour, par pompe de chaleur au lieu d'être faite par combustion, pour que les besoins en énergie primaire soient très sensiblement réduits.

Il faut donc, pour pouvoir bien nous entendre, estimer séparément les besoins en chaleur proprement dits en kilowatts chaleur par exemple — la question d'unités n'est d'ailleurs qu'une question secondaire — et nos besoins en énergie mécanique ou électrique en kilowattheures électriques par exemple. La répartition de chaque forme d'énergie primaire dans chacune de ces catégories de besoins dépendra de son aptitude à satisfaire les besoins avec un rendement convenable et avec des investissements pas trop élevés.

Pour terminer, je voudrais également insister sur le fait que les besoins en énergie ne sont pas indépendants du prix. Si l'énergie atomique arrive un jour à des prix substantiellement inférieurs au prix de revient des grandes centrales classiques, elle créera incontestablement des consommations nouvelles. Car si l'élasticité de la demande des petits consommateurs d'électricité est faible, il n'en est pas de même des très grosses consommations de l'électrochimie, de l'électrométallurgie ou, éventuellement, des industries extractives. Une baisse substantielle du coût de l'énergie serait réellement une nouvelle révolution industrielle et ferait apparaître des besoins nouveaux d'industries nouvelles très au-delà de ceux qui résultent de la simple évolution des industries actuelles.

Dans le mémoire, j'ai cité l'exemple de l'industrie des nitrates par combinaison dans l'arc électrique de l'oxygène et de l'azote de l'air. Cette vieille industrie pouvait vivre, autrefois, dans des fonds de vallée où l'énergie hydroélectrique était particulièrement bon marché. Le transport de l'énergie a permis de tirer un meilleur usage de ces kilowattheures et cette industrie est morte faute d'énergie à un prix assez bas. Le phénomène inverse peut réapparaître — pour des industries nouvelles, bien entendu — et des procédés de fabrication nouveaux créeraient certainement des besoins très massifs d'énergie si les prix de revient pouvaient tomber substantiellement au-dessous des prix des centrales conventionnelles. C'est une difficulté de plus dans l'estimation des consommations futures.

M. ROBINSON (Royaume-Uni) présente le mémoire P/757.

M. MASSON (États-Unis d'Amérique) présente comme suit le mémoire P/802 : La mesure dans laquelle l'énergie nucléaire sera utilisée au cours des 25 ou 50 années à venir pour produire de l'électricité dans des centrales dépendra principalement du coût de cette énergie par rapport à celui de l'énergie obtenue à partir des combustibles classiques. Ce coût lui-même dépendra en partie de la rapidité avec laquelle les besoins en énergie obtenue à partir des combustibles classiques augmenteront par rapport à l'offre. Ce qui nous intéresse principalement ce sont les facteurs qui déterminent le taux

d'accroissement des besoins en énergie. Si l'accroissement est aussi rapide que les prévisions le laissent supposer, il semble que le coût des combustibles classiques doive augmenter. En ce cas, quel sera l'effet de l'augmentation des prix de l'énergie sur les taux de l'accroissement économique dans le monde, et avons-nous dans l'énergie nucléaire un moyen de nous garantir contre des reculs possibles?

Les taux d'accroissement de la consommation d'énergie sont, de toute évidence, étroitement liés à ceux du développement économique. La prévision des besoins en énergie consiste essentiellement à prévoir quels seront les taux d'accroissement et les variations de la composition du revenu national dans les différents pays. Il s'agit là, évidemment, d'une question qui entre dans le domaine de la théorie; elle n'est cependant pas purement théorique. Dans certains pays industriels ayant atteint la maturité, le processus de croissance économique est presque automatique, et la situation des secteurs industriels où l'énergie est utilisée de façon intense est relativement stable. Dans ces pays, dont les États-Unis d'Amérique et certains pays de l'Europe occidentale offrent un exemple, les taux d'accroissement de la consommation d'énergie ont tendance à rester un peu en dessous du taux d'accroissement du revenu national. En effet, si le taux d'accroissement du revenu national se situe pour ces pays entre 2,5 et 3 pour cent par an, le taux d'accroissement de la consommation d'énergie est probablement de l'ordre de 2 à 2,5 pour cent par an.

Il existe une deuxième catégorie de pays, à laquelle appartiennent certains États de l'Amérique latine, qui en sont aux premiers stades de ce qui apparaît comme un processus certain de développement économique. Leur population augmente rapidement; le revenu par habitant augmente également, et les secteurs industriels se développent plus vite que l'économie dans son ensemble. Le taux d'accroissement de la consommation d'énergie sera probablement très élevé dans ces pays et pourra atteindre en moyenne 5 pour cent par an environ.

Il existe un troisième groupe de pays, ceux que l'on nomme les pays insuffisamment développés, pour lesquels les prévisions des besoins en énergie sont entourées de la plus grande incertitude. Certains des pays de ce groupe connaîtront, sous l'effet de la croissance économique et de l'industrialisation, un taux d'accroissement très élevé des besoins en énergie; d'autres, au contraire, resteront peut-être relativement stationnaires.

Si, pour différents pays, on rapporte les revenus par habitant à la consommation d'énergie par habitant, il semble exister entre ces deux séries de données une relation qui, pour être approximative, n'en est pas moins certaine. Les États-Unis d'Amérique, le Canada et la Suisse sont des pays où le revenu par habitant est très élevé; ce sont également des pays où il y a une très forte consommation d'énergie par habitant. L'Indonésie, la Birmanie et Haïti ont des revenus par habitant faibles, et un taux de consommation d'énergie par habitant également faible. En revanche, il est évident que pour des pays dont le revenu par habitant est semblable, il existe souvent de grandes différences entre le taux de consommation d'énergie par habitant. Le Danemark et la Norvège, par exemple, avaient un revenu par habitant presque égal en 1952, alors que la consommation d'énergie par habitant était en Norvège presque le double de ce qu'elle était au Danemark. De toute évidence, le taux d'accroissement des besoins en énergie sera déterminé par des facteurs autres que l'accroissement du revenu national.

Au nombre de ces facteurs, il faut compter la composition de la production nationale, le climat, le rendement relatif de l'énergie utilisée et le coût de la fourniture d'énergie. A l'échelon mondial, ainsi que l'a montré le mémoire préparé par l'Organisation des Nations Unies qui vient d'être présenté, 65 pour cent de la consommation totale d'énergie sont absorbés par les industries de transformation, les industries extractives et les transports. Si un pourcentage élevé du revenu national d'un pays provient de ces secteurs, la consommation d'énergie sera nécessairement élevée par rapport au revenu national. Il y a, d'autre part, des variations importantes d'une industrie à l'autre en ce qui concerne la consommation d'énergie par dollar de valeur ajoutée. Les industries électrométallurgiques, en particulier, utilisent l'énergie de façon intensive. Au Canada et en Norvège, les taux de consommation d'énergie par unité de revenu national sont très élevés, en grande partie à cause de l'importance qu'ont les industries électrométallurgiques dans la production nationale.

Le climat a aussi une grande influence sur la consommation d'énergie par habitant et sur la relation entre la croissance économique et les besoins en énergie. Bien qu'il soit difficile d'établir des statistiques séparées pour les besoins de chauffage des locaux, il est évident que 20 pour cent au moins de la consommation d'énergie aux États-Unis sont dus à la nécessité de chauffer les locaux, non compris les locaux industriels. Quelle qu'en soit la raison, c'est un fait qu'une grande partie des régions économiquement sous-développées dans le monde sont situées sous les tropiques. Dans ces régions, la croissance économique n'est donc pas nécessairement liée à des apports d'énergie aussi considérables que dans des climats plus froids.

Le taux d'amélioration du rendement, pour la production de l'énergie et pour son utilisation, aura, bien entendu, une influence sur la relation entre croissance économique et consommation d'énergie. Aux États-Unis, la consommation d'énergie calorifique par dollar du produit national brut, en prix constants, est tombée de 300 000 Btu (88 kWh) en 1909 à 230 000 Btu (67 kWh) en 1952.

Nous allons maintenant étudier l'influence du coût de l'énergie et des ressources énergétiques sur le développement économique et, par lui, sur les

besoins en énergie. Si l'on dispose de suffisamment de temps, il est possible de fournir de l'énergie en n'importe quel endroit pour un certain prix. Cependant, pour un laps de temps assez court, l'offre d'énergie au prix généralement pratiqué peut être très inférieure à la demande. Cette situation se produit fréquemment dans les pays sous-développés en raison de l'inégalité des taux d'accroissement dans les différents secteurs de l'économie. Il est par conséquent nécessaire, lorsque l'on étudie la relation qu'ont entre elles les conditions auxquelles l'énergie est mise à la disposition du développement économique, de tenir compte de la mesure dans laquelle les ressources et les prix sont satisfaisants.

Un examen des données disponibles sur le coût de l'énergie et le revenu par habitant dans les différents pays ne fait apparaître aucune relation entre ces deux séries de données. Parmi les pays dont le revenu par habitant est élevé, certains ont des coûts moyens de l'énergie assez bas, tandis que d'autres ont des coûts moyens élevés. Il en est de même dans les pays dont le revenu par habitant est bas. Aux États-Unis d'Amérique, il n'y a pas de relation apparente entre les coûts moyens de l'énergie d'un état à l'autre et le revenu par habitant dans ces mêmes états. Il ne s'ensuit pas que le bas prix de l'énergie n'intervienne à aucun degré pour expliquer les différences entre la prospérité et la croissance économique des diverses régions; cela veut dire, plutôt, que le prix de l'énergie ne représente qu'un facteur parmi d'autres.

Parmi les autres facteurs qui influent sur la prospérité et le développement de l'économie, les plus importants sont la disponibilité en capitaux et, pour les pays dépourvus de grandes industries sidérurgiques ou mécaniques, la disponibilité en devises étrangères. Tant la production que la consommation d'énergie exigent de forts apports de capitaux. En Europe, l'expérience montre que les investissements dans des installations de production, de transmission et de distribution d'énergie nécessaires pour produire et distribuer 250 millions de kilowattheures par année, seraient d'environ 25 millions de dollars pour une centrale de 70 000 kilowatts fonctionnant avec un taux d'utilisation de 40 pour cent. En Amérique, les investissements nécessaires pour une consommation de 250 millions de kilowattheures par année se situent, pour plusieurs industries importantes, entre 100 et 300 millions de dollars. Toutefois, une installation de 70 000 kilowatts ne représente encore qu'un faible appoint de la capacité de production ou de consommation d'énergie électrique d'un grand pays industriel. Les États-Unis d'Amérique possèdent une capacité installée bien supérieure à 100 millions de kilowatts.

En outre, pour la plupart des régions sous-développées, les besoins en capitaux étrangers pour la production et l'utilisation de l'énergie sont considérables. Pour certaines centrales électriques récemment construites en Amérique latine et financées par des prêts de la Banque internationale, l'apport de capital étranger a représenté de 36 à 72 pour cent des investissements globaux. L'installation d'un outillage qui consomme de l'énergie entraîne également, pour la plupart des régions sous-développées, de lourdes dépenses en devises étrangères.

L'expérience des pays en voie de développement semble indiquer que si le prix de l'énergie est bas, cela peut contribuer de façon appréciable à l'expansion économique lorsque le taux de formation du capital est élevé et qu'il existe des disponibilités suffisantes en devises étrangères. Bien entendu, nous ne pouvons examiner ici tous les autres facteurs qui peuvent encore influer sur la croissance économique.

Les différences entre les prix de revient de l'énergie dues à des raisons géographiques ont été réduites au cours du dernier siècle par les modifications de l'importance relative de certaines matières, par l'amélioration des transports, etc.; toutefois, ces différences sont encore considérables. Étant donné que l'une des caractéristiques les plus frappantes de l'énergie d'origine nucléaire, sur le plan économique, est le coût négligeable du transport du combustible, l'installation de centrales nucléaires dans des régions où le prix de revient de l'énergie est d'ordinaire élevé offre de grandes possibilités. Néanmoins, il faut beaucoup de capitaux pour financer des installations nucléaires et, dans la plupart des régions sous-développées, le coût du capital étranger est très onéreux. Il semble que ces considérations permettent de conclure que les premiers grands investissements pour la production d'énergie électronucléaire se feront dans les régions du monde où le coût de l'énergie est actuellement élevé et qui disposent de capitaux abondants.

En plus du fait qu'elle pourra réduire le prix de revient de l'énergie dans les régions du monde où l'utilisation des combustibles classiques est onéreuse, l'énergie nucléaire pourra contribuer à prévenir une augmentation du coût de l'énergie tirée des combustibles classiques, augmentation qui sans elle serait inévitable et affecterait le monde entier. Le coût réel de la production du charbon en Europe occidentale semble augmenter, et il en est peut-être de même du pétrole aux États-Unis d'Amérique. Bien que les réserves de pétrole du Moyen-Orient soient énormes, on pourrait voir les États-Unis et les pays d'Asie et d'Afrique qui sont en voie de développement — en plus de l'Europe occidentale — devenir dépendants de cette source au cours du prochain quart de siècle pour satisfaire leurs besoins qui augmentent toujours plus rapidement. Enfin si, à plus ou moins longue échéance, on pouvait produire l'énergie nucléaire à un coût plus avantageux que l'énergie produite aujourd'hui par des installations classiques à rendement élevé et à bas prix, les conséquences économiques d'une telle évolution dépasseraient sans doute largement tout ce que nous avons envisagé dans ce mémoire.

BESOINS ET RESSOURCES DES DIFFÉRENTS PAYS DANS LES DOMAINES ÉNERGÉTIQUE ET THERMIQUE

M. SEVETTE (Organisation des Nations Unies) présente le mémoire P/1116.

M. BHABHA (Inde) présente comme suit le mémoire P/868 : Le sujet dont j'ai à vous entretenir a été traité en détail dans le mémoire P/868, et je ne ferai qu'en résumer certains aspects.

Le potentiel hydroélectrique des fleuves du sud et du centre de l'Inde a été assez bien étudié et représente environ 14,4 millions de kilowatts. On ne connaît pas aussi bien le potentiel des fleuves de l'Himalaya, mais il atteindrait environ 20 millions de kilowatts, selon une estimation prudente. La puissance installée ne représente actuellement qu'un peu moins de 1 million de kilowatts. En Inde, les dépenses d'investissement pour la production d'énergie hydroélectrique sont, dans certains cas, plus élevées peut-être que dans d'autres pays parce que, au moins dans les régions centrales et méridionales de l'Inde, la pluie ne tombe que trois mois par an et qu'il est par conséquent nécessaire de construire, pour retenir l'eau, des ouvrages d'art très importants qui augmentent inévitablement les frais d'installation.

On estime que les dépenses d'investissement se situent entre 500 et 2 000 roupies par kilowatt de puissance installée. Le chiffre moyen est de 1 200 roupies environ, c'est-à-dire quelque 100 livres sterling, par kilowatt de puissance installée. Le prix de revient de l'électricité produite par ces installations hydroélectriques varie entre 0,17 et 0,44 anna par kilowattheure, l'anna valant environ 10 pour cent de plus qu'un penny.

Charbon : Les réserves totales de charbon sont évaluées à 40 milliards de tonnes environ. Comme je l'ai déjà dit, il ne s'agit pas là d'un chiffre absolu, mais d'un chiffre où les facteurs économiques ont été pris en considération. Il représente les quantités que l'on considère comme économiquement exploitables. D'autres sont parvenus à un chiffre de 65 milliards de tonnes. Toutefois, il faut comparer ces chiffres avec ceux obtenus pour les États-Unis d'Amérique (2 254 milliards de tonnes), pour le Royaume-Uni (172 milliards de tonnes) et pour la Chine (plus de 1 000 milliards de tonnes). Les réserves de charbon aux Indes représentent donc une centaine de tonne par habitant, c'est-à-dire cent tonnes qui, par habitant, sont en réserve dans le sous-sol. D'autre part, les régions productrices de charbon ne sont pas uniformément réparties; elles se situent à l'est et au centre du pays, dans les états de Bihar, du Bengale, de Madhya Pradesh et de Vindhya Pradesh. Aussi le charbon livré à des endroits éloignés des gisements coûte-t-il souvent plus du double de ce qu'il coûte à la mine. Bien entendu, le prix de l'énergie produite dans les centrales thermiques se ressent de cette situation.

Uranium et thorium : En ce qui concerne le thorium, on connaît assez bien les réserves disponibles : elles s'établissent entre 150 000 et 180 000 tonnes contenues dans les sables à monazite des côtes occidentale et orientale. J'ajouterai que certains de ces gîtes n'ont été découverts que récemment, si bien que nous avons de bonnes raisons d'espérer que les réserves totales dépasseront les chiffres que je viens d'indiquer. Il en est de même pour l'uranium, présent dans un minerai à raison de 0,1 pour cent ou plus, et dont les réserves sont évaluées à environ 15 000 tonnes; toutefois, ce minerai n'a été découvert qu'au cours des cinq dernières années et nous sommes fondés à croire que le sol de l'Inde, compte tenu de sa structure géologique, en renferme beaucoup plus.

Pétrole : On n'a trouvé jusqu'à présent que très peu de pétrole en Inde et son apport à l'économie est encore très faible; la quasi-totalité du pétrole consommé dans le pays est donc importée.

Nous en arrivons maintenant à un aspect très important de l'économie de l'énergie : il s'agit de l'énergie obtenue à partir de la combustion du bois, du charbon de bois et des déchets de l'agriculture. Comme l'indique le tableau qui figure dans ce mémoire, sur un total de 1 300 milliards de kilowattheures d'énergie produits chaque année, les trois quarts, soit 1 000 milliards de kilowattheures, proviennent de la combustion de déchets de l'agriculture; le charbon fournit environ 239 milliards de kWh et le reste provient de l'énergie hydraulique, du pétrole et du bois. Pour la plupart des pays industriellement évolués, le fort pourcentage d'énergie qui, en Inde, est obtenu à partir des déchets de l'agriculture, provient du charbon et se trouve en général absorbé par la consommation domestique. Si l'énergie obtenue par combustion des déchets de l'agriculture devait être remplacée par d'autres sources, le charbon ou l'énergie hydraulique par exemple, la demande de charbon serait vraiment considérable, même au faible niveau actuel de la consommation. La consommation totale d'énergie en Inde atteint aujourd'hui 0,47 tonne d'équivalent de charbon par habitant et par an. Il convient de comparer ce chiffre aux 9 tonnes consommées aux États-Unis d'Amérique et aux 5 tonnes consommées au Royaume-Uni, toujours par habitant et par an.

Il est indiqué dans ce mémoire que nos réserves sont largement suffisantes pour les vingt ou trente années à venir, compte tenu du taux maximum auquel nous pouvons les exploiter à l'heure actuelle. Ce sur quoi je veux insister n'est donc pas le problème immédiat, mais la situation dans laquelle nous nous trouverons finalement placés et, à cet égard, les chiffres sont véritablement éloquents. Si nous pouvions mettre en valeur la totalité de notre potentiel hydroélectrique, qui est de l'ordre de 35 millions de kilowatts, nous n'obtiendrions encore que le septième de l'énergie qui nous est actuellement fournie par la combustion des déchets de l'agriculture. Je viens de dire que nos réserves de charbon représentent un peu plus de 100 tonnes par habitant. Or, aux États-Unis, la consommation

de charbon est d'environ neuf tonnes par habitant et par an; à ce rythme, nos réserves ne dureraient guère plus de dix ans.

Je ferai également remarquer que le contenu énergétique de nos réserves d'uranium et de thorium — en ne comptant que les réserves actuellement connues — dépasse de plus de quinze fois le contenu énergétique des réserves connues de charbon et de pétrole.

Pour en venir aux perspectives économiques immédiates de l'énergie atomique en Inde, c'est une question que j'ai étudiée dans ce mémoire en supposant que l'électricité produite à partir de l'énergie nucléaire serait finalement distribuée au prix de 0,5 anna par kilowattheure, prix légèrement inférieur au chiffre cité dans le mémoire britannique, qui est de 0,6 penny — c'est-à-dire 0,55 anna — par kilowattheure. J'ai également supposé que les dépenses d'investissement représenteront quelque 200 millions de roupies, soit 15 millions de livres sterling pour une centrale de 100 000 kilowatts. En partant de ces données, on peut facilement se rendre compte qu'il existe en Inde des régions où l'électricité d'origine nucléaire pourrait, même aujourd'hui, soutenir assez bien la concurrence de l'électricité produite par les moyens classiques. C'est ainsi que les régions industrielles situées à l'ouest et au sud de l'Inde, celles d'Ahmedabad et de Madras par exemple, produisent l'électricité dont elles ont besoin à partir du charbon; or, ce charbon doit être amené de mines situées à des centaines de kilomètres. Dans ces régions, le coût de la production d'électricité atteint de 0,65 à 1,2 anna par kilowattheure. Ce coût est donc beaucoup plus élevé que celui de l'électricité produite dans les pays industriellement évolués, et il est assez élevé pour que l'électricité d'origine nucléaire puisse se montrer avantageuse, même aujourd'hui, en admettant qu'elle puisse être distribuée au prix que j'ai supposé. Bien entendu, l'énergie hydraulique sera toujours meilleur marché que l'énergie thermique et, partout où il existe un potentiel hydroélectrique, il convient de le mettre en valeur. Il y a cependant un point dont il faut se souvenir lorsqu'on examine les possibilités de développement hydroélectrique : il s'agit des dépenses d'investissement qui, telles qu'elles ont été indiquées, sont, dans une certaine mesure, affaire de comptabilité. En Inde, un projet d'aménagement hydroélectrique ne possède que très rarement ce seul caractère. Surtout lorsqu'il s'agit de grands projets, on associe très fréquemment les nécessités de la production d'énergie à celles de l'irrigation, cette dernière prenant à son compte une grande partie des dépenses d'investissement et réduisant par conséquent les dépenses d'investissement par kilowatt d'électricité installé. Néanmoins, avant d'entreprendre un tel projet, il faut naturellement réunir les fonds nécessaires à l'ensemble des installations; aussi les sommes totales à rassembler sont-elles vraiment beaucoup plus élevées que ne l'indiquerait le seul coût de la production d'électricité.

Une autre remarque s'impose. Non seulement, dans certains cas, le charbon doit être transporté à des centaines de kilomètres jusqu'aux centrales thermiques, mais il doit pour cela emprunter un réseau de chemin de fer déjà utilisé au maximum; si bien que la construction d'un grand nombre de centrales thermiques dans des régions éloignées des gisements de charbon devrait inévitablement s'accompagner d'investissements considérables dans l'extension du réseau ferré, soit que l'on envisage la construction de nouvelles lignes, soit que l'on double les lignes existantes, soit que l'on augmente le nombre des wagons, etc.

Il est extrêmement intéressant, à mon avis, de déterminer jusqu'à quel point l'augmentation des dépenses d'investissement nécessaires pour établir des centrales nucléaires pourrait être compensée par les économies réalisées dans le domaine des transports, c'est-à-dire par le fait qu'il n'y aurait pas besoin, comme dans le cas des centrales thermiques, de prévoir de nouvelles facilités pour le transport du charbon par voie ferrée. En tout cas, si l'on considère que le développement de l'énergie nucléaire imposera dans l'avenir de lourdes charges financières, il conviendrait de constituer des stocks de matières fissiles en vue de leur utilisation dans des types de piles plus perfectionnés; il conviendrait également, de ce point de vue, de s'y prendre assez tôt pour entreprendre un programme de construction de centrales nucléaires dans des régions éloignées des gisements de charbon; ces centrales, outre qu'elles fourniraient de l'électricité, produiraient du même coup les matières fissiles appelées à alimenter les piles de l'avenir.

Voici, en résumé, quelles sont mes conclusions :

1) Les réserves connues de charbon et d'énergie hydroélectrique en Inde sont suffisantes pour que l'industrialisation du pays se poursuive pendant quelques décennies au rythme que l'on peut considérer comme maximum;

2) Ces réserves sont insuffisantes pour qu'il soit possible de maintenir pendant plus d'une vingtaine d'années un niveau de vie équivalent à celui qui prévaut aujourd'hui dans les pays les plus industrialisés;

3) Les réserves connues d'uranium et de thorium en Inde sont quinze fois plus importantes, en valeur énergétique, que les réserves de charbon;

4) Étant donné que les réserves de charbon sont concentrées dans quelques régions seulement, le coût de la production d'énergie électrique à partir de centrales thermiques de type classique se situe entre 0,5 et 1,2 anna par kilowattheure dans les centres industriels éloignés des gisements de charbon. Dans de telles régions, l'énergie électrique produite par des centrales nucléaires pourrait certainement soutenir la concurrence de l'énergie produite par les centrales thermiques;

5) L'augmentation des dépenses d'investissement nécessaires pour la construction de centrales nucléaires serait largement, sinon en totalité,

compensée, dans certaines régions, par les économies réalisées du fait que l'on n'aurait pas besoin, comme dans le cas de nouvelles centrales thermiques de type classique, de prévoir un accroissement des facilités de transport par chemin de fer.

M. DA MOTTA REZENDE (Brésil) présente le mémoire P/125.

M. RISTIĆ (Yougoslavie) présente comme suit le mémoire P/962 : Permettez-moi de vous présenter certains chiffres illustrant d'une façon concrète la situation de la Yougoslavie et les problèmes auxquels elle doit faire face.

D'après les dernières évaluations, les besoins de la Yougoslavie en énergie augmenteront au cours de la période allant de 1955 à l'an 2000 de la façon suivante : dans l'industrie et l'industrie minière, plus de six fois; dans les transports, plus de cinq fois; dans la consommation générale, plus de trois fois; tandis que les besoins totaux en énergie augmenteront cinq fois.

Pendant la même période, la population aura presque doublé, tandis que la consommation brute d'énergie par habitant augmentera de près de trois fois. En vue du changement anticipé de la structure de la consommation de l'énergie et de l'amélioration du degré d'utilisation de l'énergie dans l'avenir, l'accroissement net de la consommation d'énergie par habitant sera encore plus grand, mais il ne suffira pas encore à satisfaire les besoins du pays. Par conséquent, la Yougoslavie restera encore assez longtemps, au point de vue de l'énergie, un pays insuffisamment développé.

En ce qui concerne la production d'énergie en Yougoslavie, le diagramme inclus dans notre étude montre que la production d'énergie a toujours été en retard par rapport aux besoins et que l'on peut prévoir la même tendance pour l'avenir. Il faut souligner que cette pénurie d'énergie est causée, d'une part, par l'insuffisance de pétrole et de dérivés du pétrole et, d'autre part, par l'insuffisance de charbons de haute qualité. Il est évident que l'énergie hydraulique, dont la situation est relativement plus favorable, n'est pas en mesure de compenser l'insuffisance de pétrole, de dérivés du pétrole et de charbons de haute qualité. L'énergie nucléaire qui sera, grâce aux efforts du monde entier, mise dans un proche avenir au service des besoins pacifiques du genre humain, ne peut pas être considérée, de l'avis de notre délégation, exclusivement comme un substitut aux sources d'énergie conventionnelles qui sont insuffisantes ou qui approchent de leur épuisement. Même si les sources conventionnelles d'énergie étaient tout à fait suffisantes, on ne devrait pas abandonner les efforts pour l'utilisation de l'énergie nucléaire, parce qu'il ne faut pas du tout perdre de vue le fait que l'énergie nucléaire représente quelque chose de qualitativement nouveau, rendant possible un grand progrès ultérieur de la science et de la technique. Le fait nouveau est constitué par l'immense concentration d'énergie dans l'unité de masse, d'une part, et par l'utilisation efficace des radiations, d'autre part, donnant naissance à de nouveaux procédés techniques et à de nouvelles expériences dans tous les domaines de la science et de la technique.

C'est précisément le sentiment que l'application de l'énergie atomique à des fins énergétiques industrielles apporte à la vie économique et sociale des pays un élément qualitativement nouveau, qui donne aujourd'hui une importance extraordinaire au problème de la formation des cadres, afin de leur permettre d'acquérir les connaissances nécessaires pour l'application de l'énergie nucléaire à des fins énergétiques industrielles. Le problème de la formation des cadres est aujourd'hui commun à tous les pays, y compris le nôtre, et constitue une nécessité qui, en dernière analyse, n'est pas uniquement liée aux chiffres concernant les autres ressources potentielles d'énergie.

En plus des données concernant l'évaluation objective du besoin pour tous les pays de développer la production de l'énergie nucléaire, il est aussi désirable que les dépenses en devises étrangères soient diminuées moyennant la production nationale d'isotopes, étant donné que les isotopes trouvent chaque jour une application plus étendue.

Dans les données que nous venons de citer, nous avons attiré l'attention sur la tendance à l'accroissement des besoins d'énergie dans notre pays et sur le déficit qui, autant que l'on puisse prévoir, existera dans la période à venir. Ce déficit entrave les efforts poursuivis par la Yougoslavie pour liquider définitivement les vestiges de son état arriéré et pour rattrapper le niveau des pays développés. Dans le cadre de ce déficit, le problème des combustibles liquides, surtout eu égard au problème du développement des transports, occupe une place spéciale. Comme exemple, nous citerons les transports maritimes auxquels une place très importante a été assignée dans les plans de développement économique de notre pays et pour lesquels notre pays dispose, comme il est bien connu, de toutes les autres conditions requises.

Toutes ces données confirment clairement le fait que, malgré ses efforts énergiques pour liquider le retard de son développement économique, héritage du passé, la Yougoslavie n'est pas en mesure d'assurer à cette économie des quantités suffisantes d'énergie en provenance des réserves connues afin de lui permettre d'atteindre un niveau existant déjà dans les pays les plus développés. En outre, notre pays serait encore moins en mesure de suivre le rythme de leur progrès futur. Ce sont justement les efforts intensifs accomplis par la Yougoslavie pour liquider ce retard qui permettent à ce pays de servir d'exemple en illustrant la situation existant dans beaucoup d'autres pays insuffisamment développés à qui les conditions historiques n'ont pas permis de parvenir au même développement que les pays plus avancés. Il est difficile de parler aujourd'hui, en ce qui concerne les pays insuffisamment développés, de la possibilité de liquider rapidement la situation difficile régnant actuelle-

ment en recourant uniquement à des sources conventionnelles d'énergie. Dans ces conditions, les données présentées prouvent qu'il est non seulement désirable, mais absolument nécessaire de développer cette source nouvelle d'énergie, différente du point de vue qualitatif, qu'est l'énergie nucléaire.

Pour toutes ces raisons, ma délégation estime que l'idée d'une économie mondiale travaillant à l'unisson mérite l'effort commun de tous les gouvernements, tant dans le domaine des possibilités et des besoins en énergie du monde que dans celui de l'élimination du danger potentiel représenté par le risque que l'énergie nucléaire soit un nouveau moyen d'accroître les différends existant entre les pays développés et les pays insuffisamment développés.

Ces derniers espèrent qu'au cours de cette phase de leur développement une aide leur sera apportée, tant sous la forme de combustible nucléaire enrichi que sous celle de l'amélioration des aspects énergétiques de l'application de l'énergie nucléaire, afin de développer leur économie et de l'amener simultanément à un niveau qualitativement élevé, en conquérant ainsi un domaine important et tout à fait nouveau. C'est là un phénomène normal, car cette évolution est dans l'intérêt de tous, aussi bien des pays les plus avancés que des pays insuffisamment développés.

Nous sommes convaincus que l'étude de ce groupe de problèmes — à laquelle nous avons tenté de contribuer d'une manière constructive en présentant le mémoire P/962 — aidera à mieux comprendre un problème qualitativement nouveau et permettra de rechercher, et de trouver, grâce à l'utilisation de l'énergie nucléaire, des solutions qui faciliteront la liquidation du retard dont souffrent certaines régions du monde dans le domaine économique, solutions qui ne pourront que contribuer à la stabilité des relations internationales et au maintien de la paix mondiale.

M. ANDERSON (Australie) présente comme suit le mémoire P/987 : Ce mémoire contient une évaluation des besoins de l'Australie en énergie électrique pour les cinquante années à venir et étudie dans quelle mesure ces besoins pourront être satisfaits au moyen des ressources et des combustibles classiques.

En premier lieu, on s'est efforcé d'évaluer le taux d'accroissement possible de la demande d'électricité au cours de la période considérée. Une semblable évaluation ne peut, bien entendu, atteindre à une grande précision ou à un grand réalisme, étant donné que la demande en énergie électrique est elle-même la résultante de facteurs nombreux et impondérables qui influent sur le développement de l'économie. Il est évident, par exemple, que cette demande dépend de facteurs tels que le taux d'accroissement de la population et du revenu national, le développement des techniques industrielles et, éventuellement, les désirs de la population. Aux fins de la présente étude, on s'est fondé avant tout sur l'évolution que la demande d'énergie électrique a effectivement suivie pendant les années récentes.

L'économie australienne, sous l'effet d'une forte immigration, s'est développée rapidement depuis la guerre. Le revenu national réel a augmenté à raison de 4 pour cent par an environ, et le taux d'accroissement de la consommation d'électricité a même dépassé ce chiffre au cours de cette période. Depuis 1920-1921, la consommation d'énergie électrique a augmenté d'environ 10 pour cent par an et le taux actuel, qui prévaut depuis un ou deux ans, est d'environ 9 pour cent. Néanmoins, en toute logique, il semble peu probable que ce taux moyen puisse se maintenir exactement à un niveau aussi élevé et l'on peut déjà constater, dans ce pays comme dans d'autres, quelques indices d'une diminution.

D'une façon générale, la méthode suivie dans ce mémoire pour évaluer les besoins futurs de l'Australie en énergie électrique a consisté à appliquer aux années à venir les taux d'accroissement constatés durant les années récentes. Dans certains cas, on a arbitrairement fixé la diminution probable de ces taux. Pour toutes les prévisions, on a supposé que le taux de développement de l'économie nationale continuerait d'augmenter rapidement; les évaluations de la demande future en énergie électrique représentent des chiffres maxima.

Une fois établie une série d'évaluations des besoins en électricité pour les cinquante années à venir, l'étape suivante consiste à comparer les chiffres ainsi obtenus avec le volume de ce que pourraient fournir les sources actuelles. En Australie, environ 14 pour cent de la production en kilowattheures proviennent de ressources hydrauliques, 3 pour cent de moteurs à combustion interne brûlant des combustibles liquides et le reste, soit 83 pour cent, de turbines à vapeur alimentées principalement au charbon.

Il n'est pas difficile d'évaluer l'apport futur de l'énergie hydroélectrique; les ressources hydrauliques de l'Australie sont limitées et presque toutes sont l'objet de programmes de développement bien déterminés. En revanche, il est assez difficile d'évaluer l'importance que pourrait avoir le pétrole en vue de la production d'énergie électrique, parce que les incidences économiques des techniques actuelles de raffinage du pétrole ne sont pas encore bien connues. D'après ce que nous savons à l'heure actuelle, il ne faut cependant pas s'attendre que le pétrole nous soit d'un très grand secours à cet égard.

Ainsi, l'évaluation de la capacité de production à partir des ressources classiques se trouve liée dans une large mesure à l'approvisionnement en charbon à vapeur, combustible qui contribuera sans doute, comme par le passé, à fournir la plus grande partie de l'énergie nécessaire à la production d'électricité.

Les approvisionnements en charbon à vapeur en vue de la production d'électricité sont étudiés de

la façon suivante : on compare les ressources de charbon actuellement connues dans le pays et la demande maxima probable de charbon, tant pour son utilisation comme combustible que comme matière première dans certaines industries.

On a procédé à une comparaison finale entre, d'une part, la totalité des besoins en énergie électrique pour les cinquante années à venir et, d'autre part, les différentes ressources énergétiques de type classique qui pourraient être affectées à la production d'électricité.

Le réseau électrique de l'Australie se compose principalement de six réseaux distincts qui aboutissent aux capitales des états. Il n'existe pas encore de véritable interconnexion entre ces différents réseaux d'état. Le charbon fait bien l'objet d'un certain commerce entre états, mais les coûts de transport sont élevés et l'on a de plus en plus tendance, actuellement, à produire l'électricité à proximité des gisements. Il est donc essentiel, lorsqu'on étudie le problème de l'approvisionnement en électricité, d'envisager séparément les six réseaux d'états et c'est ainsi que l'on a procédé dans ce mémoire pour évaluer les besoins et l'approvisionnement futurs en énergie électrique.

Examinons, pour commencer, le cas de la Nouvelle-Galles du Sud. Environ 40 pour cent de l'énergie électrique de l'Australie est consommée dans cet état. Les ressources hydroélectriques ne peuvent satisfaire une grande proportion des besoins globaux, mais la Nouvelle-Galles du Sud possède les réserves de houille les plus importants du pays. Même en supposant que la demande d'électricité continue à augmenter dans cet état au taux actuel, qui dépasse 9 pour cent par an, les besoins totaux en énergie, compte tenu du développement de l'énergie hydroélectrique, pourraient être satisfaits moyennant une consommation de 1 600 millions de tonnes de charbon pour les cinquante années à venir. En ajoutant les quantités probables de charbon qui seront nécessaires aux autres industries, et en tenant compte des quantités qui pourront être exportées vers l'Australie du Sud, les besoins totaux atteignent environ 3 550 millions de tonnes. Il convient de rapprocher ce chiffre de l'évaluation des réserves en charbon de la Nouvelle-Galles du Sud qui, bien que fondée sur des données incomplètes, atteint 11 milliards de tonnes.

L'état de Victoria consomme 25 pour cent de l'énergie électrique en Australie et le principal combustible qu'il utilise dans ses centrales thermiques est le lignite. Si la demande d'électricité dans cet état augmente au taux maximum que l'on puisse raisonnablement envisager, et si l'on tient compte de la contribution de l'énergie hydroélectrique et de l'utilisation du charbon à d'autres fins, la demande totale à prélever sur les ressources en lignite de l'état de Victoria sera de 7 milliards de tonnes environ pour les cinquante années à venir. Les ressources de lignite exploitables dans cet état sont évaluées à 31 milliards de tonnes.

En procédant à une semblable évaluation pour le Queensland, la demande à prélever sur les réserves de charbon de cet état atteindra environ 1 milliard de tonnes pour la période considérée, alors que les réserves probables sont de l'ordre de 2 milliards de tonnes.

En Australie du Sud, la situation est assez différente de ce qu'elle est dans les états de l'Est dont nous venons de parler. L'énergie hydroélectrique y est inexistante et les réserves de charbon sont peu abondantes, nombre d'entre elles n'étant exploitables qu'à des coûts toujours plus élevés. Cet état a déjà importé de grandes quantités de charbon de la Nouvelle-Galles du Sud. En comparant la demande globale à prélever sur le charbon de l'Australie du Sud pendant les cinquante années à venir et les disponibilités globales probables, il semble qu'il puisse se produire une légère pénurie si l'on n'a recours ni à des importations ni à d'autres méthodes de production d'énergie électrique. L'Australie du Sud devra probablement choisir entre deux solutions : soit importer du charbon de la Nouvelle-Galles du Sud ou de l'état de Victoria, soit faire appel à d'autres ressources énergétiques telles que l'énergie éolienne ou l'énergie nucléaire.

La Tasmanie tire aujourd'hui toute son électricité des ressources hydrauliques et son potentiel hydroélectrique devrait lui permettre de satisfaire ses besoins énergétiques jusque vers 1985. Ensuite, il est probable que les centrales thermiques alimentées par du charbon local devront compléter les ressources hydrauliques. Toutefois, les réserves de charbon ne sont ni très abondantes ni de très bonne qualité. Il pourrait donc se faire qu'au cours du siècle à venir cet état soit contraint d'importer du charbon ou d'envisager l'utilisation d'une autre source d'énergie.

Enfin, en Australie occidentale, les besoins en énergie au cours des cinquante années à venir pourront se traduire par une consommation de l'ordre de 110 millions de tonnes de charbon. Les réserves en charbon de cet état sont de l'ordre de 1 500 millions de tonnes.

Grosso modo, les disponibilités en charbon de l'Australie sont telles qu'elles devraient pouvoir largement satisfaire les besoins en énergie pour les cinquante années à venir, même si certains états doivent dépendre de plus en plus, durant la dernière partie de cette période, des importations en provenance d'autres états. Ceci étant, la nécessité de s'adresser à de nouvelles sources d'énergie, telles que l'énergie nucléaire, pourra dépendre d'une augmentation éventuelle du prix de l'électricité produite à partir des combustibles classiques, ou d'une réduction éventuelle du prix de l'énergie nucléaire en dessous des niveaux que l'on considère aujourd'hui comme probables; elle pourra dépendre également des efforts qui seraient déployés par certains états, l'Australie du Sud et la Tasmanie par exemple, pour se libérer de la nécessité d'importer du charbon des autres états.

En ce qui concerne l'évolution des coûts de production de l'électricité d'origine thermique, il ressort des données actuelles que ceux-ci auront dans l'avenir tendance à diminuer plutôt qu'à augmenter.

On n'a pas essayé dans ce mémoire de prévoir le coût de l'électricité d'origine nucléaire. Toutefois, il semble que la mise en œuvre en Australie des techniques nucléaires de production d'électricité sera fonction, dans un avenir prévisible, de la relation entre les coûts de l'énergie électrique produite dans des centrales nucléaires, d'une part, et dans des centrales thermiques de type classique, d'autre part. La production d'électricité d'origine nucléaire sera intéressante au premier chef pour les États qui, du fait de l'épuisement de leurs ressources énergétiques classiques se verront obligés de faire venir du charbon d'endroits éloignés.

M. VAN MELE (Belgique) présente comme suit le mémoire P/949 : Le mémoire dont il m'a été demandé de vous faire un exposé succinct est une tentative pour établir l'évolution probable des besoins de la Belgique en énergie au cours des 45 prochaines années et pour tâcher de définir dès maintenant, dans ses grandes lignes, le rôle que pourrait jouer l'énergie nucléaire. Ce rôle, il est sans doute prématuré de le définir complètement dès à présent. Le prix de revient de cette énergie, ses possibilités techniques ne sont même guère qu'ébauchées à l'heure actuelle. D'autre part, une période de 50 années est très longue pour établir des prévisions; aussi convient-il de faire des réserves expresses quant à la valeur d'exactitude qu'il y a lieu d'attribuer aux résultats de cette étude. Tout au plus peut-elle prétendre à établir des ordres de grandeur, des tendances générales d'évolution valables à très long terme.

L'économie énergétique belge est encore principalement axée sur le charbon. Ce combustible intervient actuellement à raison de 89 pour cent dans nos consommations d'énergie. Mais les produits pétroliers occupent une place importante puisqu'ils assurent 11 pour cent de nos besoins. Étant donné les réserves de houille encore disponibles en Belgique, suffisantes encore pendant 100 ans au rythme d'extraction actuel, on peut se demander s'il est urgent de s'intéresser à l'utilisation de l'énergie nucléaire. C'est la même question que l'on s'est posée dans d'autres pays, mieux pourvus que le nôtre de ressources naturelles, et la réponse est chaque fois oui si l'on fait le bilan des besoins approximatifs d'énergie prévisibles au cours des 50 prochaines années.

Je me bornerai à rappeler les principales hypothèses de base de l'étude. Il a été admis qu'il ne se produira aucune crise économique aiguë au cours des 45 prochaines années, ni de modifications fondamentales de la structure économique de notre pays; que son activité économique augmentera continuellement au rythme inter-décade moyen enregistré entre les deux guerres; que les rendements globaux de transformation et d'utilisation de l'énergie primaire, qui au début du siècle étaient de l'ordre de 10 à 15 pour cent et atteignent à l'heure actuelle environ 33 pour cent, augmenteront encore, mais ne pourront plus subir des améliorations du même ordre que par le passé. Pour l'an 2000 il a été admis un rendement voisin de 40 pour cent; il a été admis également que la consommation d'électricité doublera en 15 ans; que la consommation de coke en sidérurgie doublera en 45-50 ans, accroissement sensiblement équivalent à l'augmentation présumée de la production sidérurgique.

Le rendement des fours à coke et la quantité de coke nécessaire pour élaborer une tonne d'acier ont été considérés comme ne devant plus subir de modifications notables. Il a été admis que la consommation de gaz pour les besoins domestiques et industriels doublera en 25 ans; que la consommation de charbon pour l'utilisation directe diminuera d'environ 1,5 pour cent par an par suite de l'amélioration des rendements et de la substitution de combustibles liquides au charbon; enfin, que la consommation de produits pétroliers augmentera en moyenne de 6 à 7 pour cent par an jusqu'en 1980.

Au-delà de cette époque, il nous a paru difficile d'établir des estimations pour ces derniers combustibles. En effet, l'accroissement considérable de leurs utilisations risque de conduire, vers la fin du siècle, à une crise pour ces combustibles. Les ressources de pétrole du monde semblent en effet n'être que le cinquième environ de celles des combustibles solides, alors que la consommation mondiale actuelle de cette source d'énergie approche déjà de la moitié de celle du charbon.

Le cliché 1 (fig. 10 de P/949) résume l'étude. On observera l'allure franchement ascendante prévue pour les besoins en énergie primaire au cours des années à venir, conséquence directe de la stabilisation progressive des rendements. Ce fait, à lui seul, laisse pressentir qu'il faudra, un jour ou l'autre, faire appel à de nouvelles sources d'énergie.

On notera également que l'augmentation des consommations de charbon résulte principalement des besoins accrus des centrales électriques et que si aucune centrale nucléaire n'était mise en service d'ici l'an 2000, elles consommeraient à elles seules, malgré l'amélioration considérable de leur rendement, l'équivalent de toute l'extraction de nos houillères à l'heure actuelle.

Enfin, on notera que les combustibles liquides sont susceptibles, en 1980, d'intervenir à raison de 30 pour cent dans la satisfaction des besoins en énergie.

Les quantités de charbon extraites de nos mines n'ont jamais dépassé sensiblement 30 millions de tonnes par an. Il existe cependant des possibilités d'augmenter ces tonnages, ainsi que l'explique la note, mais 35 millions de tonnes par an semblent un maximum.

La Belgique devrait pouvoir importer certaines quantités de combustible, notamment des pays

membres comme elle de la Communauté européenne du charbon et de l'acier. Mais ces pays auront probablement atteint, eux aussi, à cette époque, leur plafond d'extraction, de sorte que les fournitures que pourra espérer la Belgique ne pourront vraisemblablement pas dépasser certaines limites.

Ceci constitue un second facteur qui laisse pressentir la nécessité de faire appel à l'énergie nucléaire.

En limitant les disponibilités annuelles en charbon à 35 millions de tonnes, une possibilité de pénurie systématique de ce combustible apparaît dès l'année 1980. C'est à partir de cette époque également qu'un tassement pourrait se faire sentir dans les disponibilités de combustibles liquides. C'est donc à partir de cette époque que l'utilisation industrielle de l'énergie nucléaire deviendrait hautement souhaitable en Belgique.

Dans l'estimation de l'importance qu'elle est susceptible de prendre, comme nous ne connaissons à l'heure actuelle ni toutes ses possibilités techniques, ni son prix de revient, ni comment évoluera, dans les années à venir, le prix de revient des formes conventionnelles d'énergie, nous avons attribué à l'énergie nucléaire une importance qui sera peut-être largement dépassée, mais que nous avons estimée principalement sur la base des déficits de charbon pour la production d'électricité, tout en réservant cependant une place à d'autres utilisations.

En l'an 2000, les sources conventionnelles d'énergie seront loin d'être taries. C'est leur prix de revient par rapport à celui de l'énergie nucléaire qui déterminera sans doute l'importance que prendra chacune d'elles, et on sera probablement amené à repenser complètement le problème de leur utilisation.

Sans doute l'évolution probable des besoins en énergie à laquelle on est arrivé dans cette étude est-elle basée sur des moyennes statistiques susceptibles de certains écarts. Il n'y a certes pas, pour la demande future, une ligne d'une absolue certitude, mais un éventail de lignes d'avenir présentant une certaine dispersion.

On aurait pu chercher à enserrer les prévisions entre deux limites correspondant à deux niveaux extrêmes de conjoncture. Mais sur un laps de temps aussi long que 45 ans, l'écart entre ces deux limites serait devenu fort grand et n'aurait permis aucune conclusion plausible. Aussi avons-nous cherché à dégager plutôt une tendance moyenne, que nous avons d'ailleurs établie avec prudence.

Néanmoins, en adoptant les estimations telles qu'elles viennent d'être définies, on observera que l'énergie nucléaire ne peut manquer de jouer en Belgique un rôle de premier plan, d'autant plus important qu'elle nous assurera une large autonomie d'approvisionnement et qu'elle est susceptible, si elle est peu coûteuse, de donner une impulsion très forte au développement économique de notre pays.

M. Ševčík (Tchécoslovaquie) présente comme suit le mémoire P/799 : Lorsqu'on envisage les perspectives à long terme de la consommation d'énergie, il convient, en analysant aussi bien la situation présente que l'évolution passée de l'économie énergétique, de dégager les facteurs qui exercent une influence décisive sur cette consommation et son accroissement.

Une analyse de ce genre, à laquelle il a été procédé dans le mémoire présenté, montre que la demande d'énergie augmente plus rapidement que la production industrielle du fait que l'énergie électrique offre d'immenses possibilités quant au perfectionnement des procédés de fabrication par l'application de méthodes nouvelles et à l'accroissement de la productivité du travail par la mécanisation et l'automatisation. Grâce à sa commodité d'emploi et à son meilleur rendement, l'énergie électrique est plus largement utilisée que les autres formes d'énergie, auxquelles elle se substitue assez fréquemment; aussi sa consommation augmente-t-elle plus rapidement que la consommation globale de l'énergie sous toutes ses formes.

Par ailleurs, cet essor de l'énergie électrique a été favorisé par le fait que son prix de revient a diminué progressivement, cependant que les investissements nécessaires à l'aménagement des centrales électriques sont demeurés comparables aux dépenses d'équipement des autres secteurs de l'économie.

Il n'y a aucune raison de croire que les facteurs précités ne joueront que pendant un temps limité. Même dans les pays économiquement avancés, il est nécessaire d'améliorer constamment les méthodes de production; par ailleurs, il est indispensable d'alléger le travail humain et, par conséquent, d'augmenter sa productivité, si l'on veut réaliser des progrès véritables et relever le niveau de vie de la population.

C'est pourquoi il est permis de conclure que la consommation d'énergie électrique en Tchécoslovaquie continuera d'augmenter pendant de longues années à un rythme correspondant à l'essor de l'économie nationale. Or, ce rythme est élevé en Tchécoslovaquie, en raison des succès remarquables obtenus par la planification centralisée de l'économie nationale dans le cadre d'une structure socialiste de la société. Il en résulte également une augmentation de la production d'énergie électrique qui, d'une manière générale, a triplé entre 1937 et 1953 et continue d'augmenter à raison de 11 pour cent par an environ.

Sur la base d'études assez étendues auxquelles a procédé un groupe de spécialistes des questions énergétiques, études qui ont porté aussi bien sur la consommation que sur la production d'énergie, on peut formuler, en ce qui concerne la Tchécoslovaquie, les perspectives suivantes dans ce domaine : au cours des cinq à dix prochaines années, la production de l'énergie électrique continuera de se faire dans les mêmes conditions économiques que jusqu'à présent; d'une manière générale, la

proportion actuelle entre l'électricité d'origine hydraulique et l'électricité d'origine thermique sera maintenue, cependant que les prix de revient diminueront progressivement. Allant de pair avec les perspectives de développement des autres secteurs de l'économie, la consommation d'énergie électrique atteindra environ 40 à 45 milliards de kilowattheures en 1965, soit près de 3 000 kilowattheures par habitant.

Dès avant 1975, cette consommation atteindra quelque 80 à 100 milliards de kilowattheures. A l'heure actuelle, les perspectives à plus long terme ne peuvent guère influer sur la solution des problèmes relatifs à l'exploitation de l'énergie nucléaire. Ces perspectives sont fort problématiques, étant donné que des changements peuvent survenir dans la production et l'utilisation de l'énergie; c'est la raison pour laquelle nous n'avons formulé aucune prévision pour l'an 2000.

Quant à la possibilité de produire assez d'énergie pour satisfaire la consommation envisagée, elle est limitée — si l'on s'en tient aux ressources classiques d'énergie — eu égard à l'industrialisation très poussée de la Tchécoslovaquie et à sa forte densité de population.

Compte tenu de la situation géographique de la Tchécoslovaquie, ses ressources hydrauliques sont relativement modestes; le potentiel total équivaut à peu près à la production actuelle d'énergie électrique et il est exploité à 10 pour cent environ. Dans l'avenir, les ressources hydrauliques devront être utilisées principalement pour l'approvisionnement en eau.

Quant aux réserves de combustible, celles qui étaient d'un accès facile ont déjà été en grande partie épuisées du fait des industries traditionnelles. Il sera donc nécessaire d'exploiter progressivement des gisements moins accessibles et moins étendus, situés à de plus grandes profondeurs ou dans des conditions géologiques moins favorables. Par ailleurs, il sera indispensable de fournir à la métallurgie et à l'industrie chimique des quantités sans cesse croissantes de charbon de qualité supérieure; les charbons de catégorie inférieure et les résidus du traitement du charbon ne pourront assurer le développement indispensable des centrales à vapeur; on serait donc contraint, pour les besoins de ces centrales, d'extraire du charbon de qualité inférieure dans des gisements difficilement accessibles, ce qui entraînerait des frais considérables.

L'extraction du pétrole en Tchécoslovaquie ne saurait influer sur la production d'énergie électrique ou thermique. Il en est de même pour le gaz naturel, qui ne peut avoir un rôle tant soit peu important dans la production future d'énergie électrique.

D'autre part, du point de vue géographique, les sources d'énergie sont réparties d'une manière excentrique par rapport aux centres de consommation; de ce fait, le coût d'établissement des centrales électriques est plus élevé, car il est nécessaire de prévoir le transport à grande distance de l'énergie, de consacrer des sommes importantes à l'amenée d'eau, au transport des combustibles, etc. Dans ces conditions, il sera difficile, avec les méthodes actuelles de production d'énergie électrique, d'obtenir dans l'avenir (c'est-à-dire après 1965) cette diminution progressive du prix de revient de l'énergie qui est précisément l'un des facteurs déterminants du niveau de consommation.

D'un autre côté, le haut degré d'industrialisation, le niveau technique élevé des travailleurs industriels et les progrès scientifiques créent des conditions favorables à l'utilisation de l'énergie nucléaire dans l'économie énergétique de la Tchécoslovaquie, et le pays dispose également des ressources naturelles nécessaires à cet effet.

Jusqu'en 1960, l'augmentation de la consommation pourra être satisfaite en grande partie à l'aide des ressources habituelles, mais il est probable qu'après cette date des considérations d'ordre économique justifieront le recours à des centrales électronucléaires pour faire face à toute augmentation ultérieure de la demande, si bien que la production de ces centrales atteindrait environ 20 milliards de kilowattheures vers 1970, et 60 milliards en 1975.

Il s'ensuit que la Tchécoslovaquie est intéressée au premier chef aux progrès des travaux de recherche dans le domaine de l'utilisation de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques; le Gouvernement de la République tchécoslovaque consacre une attention particulière à ce domaine par l'entremise du Comité gouvernemental chargé des questions relatives à l'étude et à l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques.

La généreuse assistance de l'Union soviétique présente une importance toute particulière pour la poursuite de ces travaux et l'accélération de leur rythme. Les accords conclus en avril 1955 entre la République tchécoslovaque et l'Union des Républiques socialistes soviétiques, qui prévoient la fourniture d'un matériel de recherche des plus modernes, et aux termes desquels des spécialistes tchécoslovaques auront la possibilité de recevoir une formation et d'accomplir des stages dans des instituts scientifiques de l'Union soviétique, représentent une contribution majeure au développement de l'utilisation de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques en Tchécoslovaquie.

Cette assistance non seulement n'est assortie d'aucune condition de caractère politique ou économique, mais peut servir de modèle pour la coopération entre gouvernements dans ce domaine, coopération dont l'objectif doit être de hâter la solution des immenses problèmes que pose l'utilisation de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques et de réduire le volume des moyens à mettre en œuvre pour les résoudre.

M. Aki (Japon) présente comme suit le mémoire P/1060 : Chacun sait que des ressources énergétiques sont indispensables dans le monde d'aujour-

d'hui. Au Japon, la consommation par habitant se situait, dans les années 1890, entre 0,4 et 0,5 tonne d'équivalent de charbon par année. A cette époque, le bois de feu et le charbon de bois constituaient les principales sources d'énergie et représentaient environ 80 pour cent de l'ensemble de l'énergie produite. Le reste, soit 20 pour cent, était tiré du charbon. En 1925, la consommation par habitant atteignait 0,8 à 0,9 tonne d'équivalent de charbon. Le charbon représentait 60 pour cent de l'énergie produite, le bois de feu et le charbon de bois 30 pour cent, l'électricité d'origine hydraulique 10 pour cent; on consommait en outre une très faible quantité de pétrole. Au fur et à mesure que l'industrialisation se poursuivait, la production de charbon augmentait rapidement. En 1940, la consommation d'énergie atteignait son maximum, avec 1,58 tonne d'équivalent de charbon, mais en 1945 elle tombait à 0,67 tonne.

Après la guerre du Pacifique, on s'est tout d'abord attaché à augmenter rapidement la production de charbon, après quoi on s'est efforcé de mettre en valeur les ressources hydroélectriques. Le résultat a été que la quantité d'énergie consommée est passée à 1,24 tonne par habitant en 1953. Nous estimons que le rétablissement de la situation économique du Japon doit beaucoup à l'augmentation des disponibilités énergétiques du pays.

En 1953, la production totale d'énergie a atteint 108 millions de tonnes d'équivalent de charbon, qui se répartissent entre les différentes sources de la façon suivante : charbon, 46,6 pour cent; électricité d'origine hydraulique, 29,6 pour cent; bois de feu et charbon de bois, 11 pour cent; pétrole, 12,8 pour cent. Si l'on déduit de la consommation totale de charbon le pourcentage qui a été utilisé à la production d'électricité dans les centrales thermiques, nous arrivons pour l'énergie tirée du charbon à un pourcentage de 40 pour cent seulement, tandis que le pourcentage qui revient à l'énergie électrique passe à 39 pour cent. Si l'on considère la consommation d'énergie, elle a été couverte par des importations à raison de 95 pour cent pour le pétrole et de 10 pour cent pour le charbon. Ainsi, on voit d'emblée que la consommation totale d'énergie est satisfaite à raison de 80 pour cent par le charbon et l'énergie hydroélectrique, ces deux sources entrant chacune à peu près pour la moitié dans ce pourcentage. Il faut également remarquer qu'au cours des années récentes, l'électricité et le pétrole ont fait l'objet de la plus forte demande.

L'ensemble des gîtes de charbon au Japon est évalué à 18 600 millions de tonnes, et le potentiel hydroélectrique à 22 millions de kilowatts. Depuis la fin du dix-neuvième siècle, une production suffisante de charbon d'origine nationale, ainsi qu'une production abondante d'énergie hydroélectrique, ont permis au Japon de s'industrialiser très rapidement. Pendant la période 1931-1940, la production industrielle du Japon a augmenté au taux de 6,1 pour cent par an, alors que sa production énergétique augmentait au taux annuel de 6,8 pour cent. L'abondance des ressources énergétiques a progressivement transformé la structure industrielle du Japon où les industries électrochimiques et électrométallurgiques ont pris de nos jours une place plus importante.

Cette situation a été à l'origine de certaines difficultés d'ordre économique. Vous le savez peut-être, l'économie japonaise dépend du commerce extérieur. Le prix élevé et l'instabilité des conditions d'approvisionnement en charbon et en électricité ont parfois fait dire à des dirigeants de l'industrie qu'il y avait là un des principaux obstacles au développement de nos exportations. On peut dire que la structure de notre industrie s'est édifiée dans des conditions données d'approvisionnement en énergie. Durant ces dernières années, ces conditions ont peu à peu changé et il en est résulté un accroissement des coûts de fabrication pour certains articles.

De fait, la pureté du charbon s'est dégradée de 14 pour cent au cours des vingt dernières années et l'épaisseur moyenne des gîtes a diminué de 9 pour cent, tandis que les quantités d'eau d'évacuation augmentaient de 40 pour cent. Au Japon, le rapport entre le montant des réserves de charbon évaluées et celui de la production annuelle de charbon est, croyons-nous, le plus élevé du monde. Dans ces conditions, il sera extrêmement difficile d'abaisser le coût de production du charbon au Japon.

Dans le domaine de l'énergie hydraulique, 37 pour cent seulement du potentiel total ont jusqu'à présent été mis en valeur. Néanmoins, les caractéristiques naturelles des sites où l'on pourrait envisager de construire de nouvelles centrales hydrauliques sont telles que la mise en valeur de ces ressources devient de plus en plus difficile. Fait plus inquiétant encore, là où il existe un potentiel hydraulique — et quand bien même il tombe des pluies abondantes — les rivières ont une pente si douce que les centrales du type « au fil de l'eau » — type le plus répandu au Japon — qui pourraient y être aménagées ne produiraient l'électricité qu'à un coût assez élevé. Ce sont donc les centrales du type à réservoir qui semblent convenir le mieux en ce cas, mais la plupart des sites intéressants sont intensément peuplés et l'acquisition des droits de propriété ainsi que le relogement des habitants posent de nombreux problèmes.

Au Japon, la plupart des centrales hydroélectriques sont du type « au fil de l'eau » et, par conséquent, la production d'énergie est directement fonction du débit naturel des rivières. La production d'électricité repose sur une exploitation combinée des centrales hydrauliques et thermiques, les premières fournissant surtout la charge de base et les secondes surtout les pointes en saison sèche. Pour cette raison, et étant donné les progrès qui ont été apportés récemment à ces deux types de centrales, nous cherchons maintenant à mettre au point de nouvelles méthodes d'exploitation combinée. Néanmoins, tous ces facteurs contribuent à

augmenter le prix de revient de l'énergie, et il s'ensuit naturellement des répercussions dans diverses industries existantes ou sur le point de se constituer.

Selon nos évaluations, si le niveau de vie des Japonais doit être relevé de 50 pour cent au cours des vingt années à venir, il nous manquera environ l'équivalent de 50 millions de tonnes de charbon. Il nous faut, bien entendu, nous efforcer de tirer le meilleur parti de nos ressources énergétiques, d'utiliser l'énergie avec un rendement plus élevé et d'exploiter de nouvelles ressources énergétiques, par exemple l'énergie solaire, l'énergie géothermique, etc. Néanmoins, l'utilisation de l'énergie solaire ou de l'énergie géothermique sera limitée à certaines zones bien déterminées. C'est pourquoi la production d'électricité au moyen de l'énergie nucléaire devrait, à notre avis, être entreprise.

Le Japon est peut-être un des pays industrialisés où se posent les problèmes les plus complexes d'approvisionnement en énergie. Nous n'avons aucune expérience de la production d'électricité par les techniques nucléaires, mais nous croyons fermement qu'il sera possible de la développer en vue de son utilisation dans l'industrie et nous mettons de grands espoirs en cette possibilité.

M. MENDIVELZÚA (Argentine) présente comme suit le mémoire P/998 : Ce mémoire s'ouvre par un bref exposé sur la géographie du pays, exposé qui permettra de situer les régions de peuplement ainsi que les centres de production et de consommation d'énergie et qui aidera à éclaircir certaines questions relatives aux besoins futurs en énergie et aux différents moyens d'y subvenir.

Vient ensuite une vue d'ensemble de la situation énergétique du pays et, finalement, une estimation des besoins futurs calculés pour l'année 1980, d'après laquelle on a essayé de déterminer la forme et l'importance que pourrait prendre l'apport de l'énergie nucléaire.

Le territoire de la République Argentine, dans sa partie continentale, a la forme d'un triangle renversé et s'étend approximativement entre 21° et 55° de latitude sud et 53° et 73° de longitude ouest.

Outre son territoire continental, la République Argentine comprend les archipels des Malouines, de la Géorgie du Sud, des Orcades du Sud, des Sandwich du Sud, ainsi que le secteur antarctique argentin qui s'étend entre 25° et 74° de longitude ouest et entre le 60e parallèle et le pôle Sud.

La superficie de la partie continentale du territoire est de 2 778 412 km² et la superficie totale de 4 026 000 km².

En 1953, la population du pays était de 18 221 000 habitants; elle dépasse aujourd'hui 19 millions, ce qui représente une densité de 4,5 habitants au km² si l'on considère la superficie totale, et de 6,5 habitants au km² si l'on ne tient compte que de la superficie du territoire continental.

La population est répartie de façon très inégale avec de grandes concentrations dans certaines régions [cliché 2 (fig. 1 de P/998)]; environ 60 pour cent de la population se trouve dans la zone ombrée qui ne représente que 16 pour cent de la superficie totale.

C'est dans ces régions de grand peuplement que se consomment 80 pour cent de l'électricité, presque entièrement d'origine thermique, et une proportion analogue des combustibles. D'autre part, les sources d'énergie et de combustibles utilisables ou disponibles se trouvent dans des régions très éloignées de ces centres de consommation.

La principale ressource énergétique est le pétrole qui est concentré dans quatre zones : Comodoro Rivadavia, à 1 500 kilomètres par voie maritime des centres de consommation; Campo Durán, au nord, à 1 900 kilomètres de ces centres; Mendoza et Neuquén, à plus de 1 000 kilomètres.

Les ressources hydroélectriques exploitées, qui en 1957 représenteront 500 000 kilowatts de puissance installée, sont situées dans des zones où la consommation est très réduite, et le principal gisement carbonifère est situé dans le Rio Turbio, c'est-à-dire à 250 kilomètres par voie ferrée et 2 000 kilomètres par voie maritime des centres de consommation.

Les combustibles d'origine végétale, bien qu'ils soient plus répandus et plus proches de certains centres de consommation, présentent également des difficultés de transport.

Bien qu'il soit très riche de possibilités pour ce qui est des combustibles et des autres sources d'énergie, le pays se voit actuellement obligé de consacrer une grande partie de son potentiel économique à l'importation de combustibles. La politique du pays, en ce qui concerne l'énergie, tend à établir le plus rapidement possible l'équilibre entre les besoins nationaux et la production intérieure. Pendant la période comprise entre 1938 et 1952, la consommation totale d'énergie de toute origine, exprimée en tonnes de pétrole, a varié entre 10 millions en 1938 et plus de 16 millions en 1953. Cette augmentation est presque exclusivement due aux combustibles, étant donné que l'énergie hydroélectrique ne représente actuellement que l'équivalent d'un demi million de tonnes de pétrole.

La consommation a presque doublé en moins de vingt ans et, depuis une date récente, le pays se trouve obligé, en dépit des ressources naturelles dont il dispose, d'importer la moitié des combustibles qu'il consomme. Il en résulte des dépenses de l'ordre de 200 millions de dollars chaque année, chiffre qui prend toute son importance lorsqu'on le compare à celui de l'ensemble des importations puisqu'il représentait 23 pour cent de leur valeur totale en 1953. En tonnage, les combustibles représentent également entre 65 et 70 pour cent du total utilisé pour l'exportation.

En examinant la situation pour chaque combustible pris séparément, on constate que le pétrole

constitue la principale source d'énergie du pays. La production a été de 3 600 000 tonnes en 1952, l'Argentine venant ainsi au onzième rang dans le monde avec 0,6 pour cent de la production mondiale. La production de pétrole et de dérivés du pétrole étant insuffisante, nous avons importé, en 1952, 3 800 000 tonnes de ces produits. En résumé, nous produisons 0,6 pour cent du pétrole mondial, mais notre consommation est le double de notre production. Nous consommons également 900 millions de mètres cubes de gaz naturel et 300 millions de mètres cubes de gaz industriel.

L'importation de charbon est de l'ordre de 1 500 000 tonnes et l'apport des charbonnages indigènes a été jusqu'à présent très faible; ils n'ont fourni que 150 000 tonnes en 1953.

La consommation de bois et de déchets d'origine végétale représente un pourcentage important du total des combustibles consommés dans le pays. La consommation moyenne par habitant et par an, dans le monde, est de 430 kg; elle atteint 800 kg dans notre pays. Nous consommons normalement quelque 15 millions de tonnes de bois, dont 13 millions, soit plus de 85 pour cent, sont utilisés soit directement comme combustible, soit pour la fabrication du charbon de bois.

La République Argentine ne se classe pas parmi les pays grands producteurs et grands consommateurs d'énergie électrique. Bien que les chiffres soient satisfaisants si on les compare avec ceux d'autres pays, il faudra s'efforcer par tous les moyens, étant donné le rapide accroissement démographique et le grand développement industriel du pays, d'augmenter considérablement la production.

L'énergie électrique produite dans le pays est surtout d'origine thermique, la consommation totale de combustible étant équivalente à 2 millions de tonnes de pétrole par an pour une production moyenne d'environ 5 milliards de kilowattheures.

Si l'on rapporte le nombre de calories consommées dans les installations de production d'énergie électrique au total des calories consommées dans le pays, on constate que 13 pour cent correspondent à la production d'électricité.

La puissance actuellement installée est de deux millions de kilowatts, c'est-à-dire 100 watts par habitant, et correspond à une consommation d'environ 270 kilowattheures par habitant et par an.

Le potentiel hydroélectrique total est de l'ordre de 20 millions de kilowatts. Dans l'état actuel de la technique, le potentiel économiquement utilisable serait d'environ 7 millions de kilowatts, dont 150 000 seulement sont mis en valeur; on espère pouvoir arriver à 500 000 kilowatts avant trois ans.

D'après les données disponibles et en se limitant à des prévisions raisonnables, il est possible de déterminer quelle sera la situation d'ensemble de l'énergie dans un avenir pas trop éloigné, c'est-à-dire jusqu'en 1980. Pour un pays en plein développement et dont la population augmente rapidement, comme c'est le cas en Argentine, il serait très incertain d'établir des prévisions portant sur une période plus longue.

Durant la période précitée, la consommation d'énergie augmentera pour deux raisons : accroissement de la population, augmentation de la consommation par habitant, D'après nos évaluations, la population pourrait atteindre 31 millions d'habitants en 1980 et 45 millions en l'an 2000. Quant à l'augmentation de la consommation d'énergie, il faut l'envisager sous deux aspects, c'est-à-dire en tenant compte, d'une part, du développement de l'énergie électrique, et, d'autre part, de l'augmentation de la production de combustibles destinés à des fins diverses.

A l'heure actuelle, des plans sont en exécution pour intensifier l'exploitation de toutes les sources d'énergie : pétrole, gaz, combustibles d'origine végétale, installation hydroélectriques et ressources géothermiques.

Les considérations qui précèdent permettront de se faire une idée du rôle que l'énergie nucléaire pourrait être appelée à jouer dans notre pays. Les combustibles disponibles devront être utilisés à d'autres fins que la production d'énergie électrique, c'est-à-dire à couvrir l'augmentation des besoins en énergie thermique, ou bien à réduire les importations et finalement à en supprimer la nécessité.

La demande d'énergie électrique augmentera pendant les vingt-cinq années à venir et l'on prévoit qu'en 1980 la consommation d'électricité aura triplé par rapport à son niveau actuel, ce qui, multiplié par le nombre probable d'habitants, signifie que la puissance installée nécessaire sera de 10 millions de kilowatts en 1980.

La puissance disponible est actuellement de 2 millions de kilowatts et on espère qu'elle sera doublée d'ici la fin de 1957. Il faudrait donc, avant 1980, installer une puissance supplémentaire de 6 millions de kilowatts : on projette d'en obtenir la moitié au moyen de centrales électronucléaires.

L'installation de centrales nucléaires pourrait se faire en Argentine dans de nombreuses zones dont l'accès par voies de communication est difficile ou coûteux. On pourrait ainsi créer des zones industrielles là où jusqu'à présent aucune mise en valeur n'a pu avoir lieu; en ce cas, les évaluations que nous venons d'indiquer pourraient être dépassées.

Nous ne sommes pas encore en mesure de préciser quel sera le coût de l'énergie nucléaire dans notre pays, mais il nous est permis d'avancer que celle-ci pourra entrer en concurrence avec l'énergie produite actuellement par d'autres moyens. En effet, le coût de cette dernière se trouve majoré par différents facteurs : frais de transport, installation de longues lignes de transport d'énergie, et nécessité d'importer des combustibles. Ce dernier point est très important si l'on considère non seulement la

valeur absolue de ces importations, mais les dépenses en devises étrangères qu'elles entraînent.

De plus, et c'est là un point essentiel, il existe dans le pays les matières fissiles et une grande partie des substances accessoires qui serviront à construire les piles. C'est pour cette raison, jointe aux considérations déjà exposées, qu'un vaste programme a été élaboré dans notre pays pour l'étude, la mise sur pied et la construction d'un réseau de centrales nucléaires. On trouvera dans un autre rapport des détails sur l'état de ces études, ainsi qu'une description des exploitations minières, des installations actuelles et futures, et des caractéristiques des usines projetées.

Le PRÉSIDENT : Avant d'aborder la discussion générale, nous allons écouter quatre orateurs — représentant respectivement l'Égypte, le Pakistan, Israël et Ceylan — qui désirent présenter des observations supplémentaires.

M. ABDEL-RAHMAN (Égypte) : Étant le premier des orateurs non inscrits au programme, je pense qu'il me sera permis, si le Président y consent, de citer seulement quelques chiffres et de ne parler que des considérations générales formulées dans l'étude que je vais présenter au nom de la délégation de l'Égypte (mémoire P/1108).

Ayant assisté aux deux premières séances, j'ai pu constater que l'étude que nous avons préparée et dont le texte intégral sera distribué en temps utile a été établie selon une méthode qui se rapproche plutôt de celle qu'a suivie M. Robinson que de celle qui a été utilisée pour la préparation du mémoire P/902 présenté par l'Organisation des Nations Unies.

En premier lieu, nous avons tenté d'évaluer la situation globale des besoins de l'Égypte en énergie — thermique, électrique, etc. —, c'est-à-dire le bilan énergétique tel qu'il se présente actuellement. Ce bilan s'établit pour l'année 1952 à un total de 12 mégakilowattheures environ; sur cette quantité, 3 mégakilowattheures seulement se répartissent entre l'énergie mécanique et l'énergie électrique. La principale source d'énergie dans notre pays est le pétrole, dont la moitié provient de l'importation, l'autre moitié étant de production nationale; la capacité de raffinage correspond à plus de 50 pour cent du total.

Ensuite, nous avons estimé la façon dont cette énergie se répartit selon diverses utilisations et différentes régions. En tenant compte du régime d'utilisation de l'énergie et en appliquant aux dix ou vingt années à venir les données des années récentes, nous avons pu établir avec passablement de détails et par étapes quels seraient les besoins en énergie en 1965 et 1975. Avec cette méthode, nous n'avons pas fait d'évaluation allant au delà de 1975.

Le bilan énergétique définitif, tel qu'il se présente pour 1965 et 1975, est reproduit dans le texte. Il indique que les besoins en énergie électrique dépasseront le niveau de la production actuelle d'environ quatre fois en 1965 et d'environ neuf fois en 1975.

Pour répondre à la demande d'électricité, il semble que les centrales hydroélectriques fourniront l'apport le plus important en Égypte durant les vingt années à venir. Deux grandes installations, l'actuel barrage d'Assouan et le Grand Barrage — qui sera l'un des plus grands ouvrages hydrauliques du monde — fourniront à elles seules environ 60 pour cent de l'accroissement exigé.

Néanmoins, l'écart à combler sera encore d'environ un demi million de kilowatts à installer, sans compter les besoins de remplacement du matériel ou la transformation de l'outillage mécanique en outillage entièrement électrique.

Vers l'année 1961, en plus des installations hydroélectriques déjà prévues, l'Égypte devra envisager l'aménagement, dans la région d'Alexandrie, d'une centrale développant environ 100 millions de watts. A cette date, ou même déjà en 1957 ou 1958, l'Égypte devra étudier très sérieusement et de façon réaliste le mode de fonctionnement — thermique ou nucléaire — à adopter pour cette centrale, dont la mise en service est prévue pour 1961. D'ici là, il faudra procéder à des essais. On peut considérer que la mise en valeur des ressources hydroélectriques sera terminée en 1975. Après cette date, il faudrait pouvoir disposer de nouvelles centrales, capables d'augmenter la puissance installée d'environ 100 millions de watts chaque année. Aussi conviendra-t-il, en 1972, d'étudier encore une fois très sérieusement la possibilité de construire des centrales nucléaires à côté des centrales thermiques de type classique.

Tels sont, en résumé, les résultats de notre étude. Cependant, après ce que nous avons entendu ce matin, il y a un ou deux points sur lesquels j'aimerais qu'il me soit permis de m'arrêter.

Tout d'abord, le Président de cette Conférence a mentionné ce matin trois étapes du développement de la civilisation, ces trois étapes étant liées à la disponibilité d'énergie utile. Il a parlé d'une quantité Q représentant l'énergie utilisée. Cette quantité se mesurait dans les siècles précédents, et depuis les premiers âges de la civilisation, en fractions de Q par siècle. A l'heure actuelle, elle est de plusieurs dizaines de Q par siècle et, selon les estimations, l'énergie atomique se mesurera en milliers de Q : le Président a cité le coefficient 1 700. A mon avis, il s'agit là d'un changement radical, et toutes nos évaluations et toutes nos discussions sur la continuité de la tendance de l'énergie pourraient ne pas être exactes. Il pourrait y avoir une solution de continuité dans ce domaine en raison de la discontinuité des ressources énergétiques disponibles.

Je ne puis entreprendre une étude détaillée de cette question, que je voulais seulement mentionner; car si, aux fins de notre étude, nous nous en sommes tenus à la méthode des évaluations fondées sur une évolution continue, il se pourrait

fort bien qu'une rupture grave vienne briser cette continuité.

Une autre question que je désire soulever est la suivante : notre conférence étudie l'énergie atomique, c'est de l'énergie que nous parlons. Cependant, en songeant aux usages auxquels sera destinée cette énergie, nous constatons qu'avant son utilisation définitive, l'énergie exige l'emploi de matières appartenant au règne minéral ou au règne biologique. Si le développement de l'énergie doit atteindre les proportions énormes dont on nous a parlé, disposons-nous de suffisamment de minéraux? Il nous faut également, à ce stade, nous demander quels seraient les effets de cette expansion sur la transformation et la production de nos activités, ainsi que sur l'utilisation des minéraux et des végétaux. S'il doit se produire une pénurie de minéraux, je pense que la structure de notre civilisation et de notre appareil de production en sera affectée. De même, si le monde doit connaître une pénurie de denrées alimentaires, les modalités de l'utilisation de l'énergie — de cette énergie dont nous parlons maintenant, qui est disponible en si grandes quantités — en subiront le contrecoup.

Cette dernière remarque vient à l'appui de mes constatations précédentes et m'incite à répéter qu'il pourrait se produire une discontinuité, sinon d'ici vingt ans — ce qui semble peu probable — du moins au cours des cinquante années à venir.

Une remarque encore : les chiffres cités dans les mémoires qui ont été présentés à cette Conférence m'incitent à faire une recommandation. Il conviendrait, après la présente conférence, d'instituer quelque organe ou comité permanent afin d'uniformiser les méthodes statistiques utilisées pour les évaluations énergétiques. Je constate que les chiffres que j'ai établis pour l'Égypte sont très différents d'autres chiffres, également relatifs à l'Égypte, cités dans d'autres mémoires présentés à cette Conférence. J'estime donc qu'il est nécessaire d'uniformiser les méthodes de rassemblement des statistiques, ainsi que la façon d'évaluer les besoins en énergie des différents pays.

M. Ahmad (Pakistan) : Je désire présenter quelques très brèves remarques sur les besoins en énergie du Pakistan. La population de ce pays atteint presque 80 millions d'habitants et elle augmente chaque année à raison de près d'un million d'habitants; or, la consommation annuelle d'énergie électrique par habitant est seulement de 5 kilowattheures. Nous estimons que l'énergie est une nécessité vitale pour le développement agricole de notre pays, qu'il s'agisse de draîner les régions basses du Pakistan oriental sujettes aux inondations, d'irriguer des terres par pompage d'eau provenant de puits instantanés ou d'assécher les terres du Pakistan occidental. Nous estimons qu'il est nécessaire d'avoir recours à de telles méthodes — drainage, asséchement ou puits instantanés — pour produire des récoltes capables de subvenir aux besoins toujours croissants de notre population.

De même, nous estimons que l'énergie est indispensable à notre développement industriel, qu'il s'agisse d'industries nouvelles que nous sommes en train de mettre rapidement sur pied de façon à fournir les produits de base nécessaires à notre population, ou qu'il s'agisse de la fabrication d'engrais pour notre agriculture ou de la mise en valeur de nos ressources minérales.

Besoins en énergie : Actuellement, la demande totale de puissance atteint 553 mégawatts, dont 128 seulement sont produits par des entreprises du réseau public. L'énergie produite est surtout tirée du charbon et, dans une moindre mesure, des ressources hydrauliques. Compte tenu des plans de développement économique que nous avons élaborés et dont l'exécution a déjà commencé, compte tenu également de l'accroissement démographique probable, nos besoins en énergie atteindront sans doute 1 118 mégawatts dans les dix années à venir, 1 913 mégawatts en 1975 et 6 430 mégawatts en l'an 2000. Ces chiffres correspondent approximativement à un taux d'accroissement de 8 pour cent par an jusqu'en 1965 et de 5 pour cent par an dans les années qui suivront.

Ressources énergétiques : Les réserves de charbon du Pakistan sont évaluées à 100 millions de tonnes environ; néanmoins, elles ne peuvent pas être exploitées intégralement pour répondre aux besoins de notre économie ou pour produire de l'énergie sur le plan industriel, ceci pour de nombreux motifs dont les principaux sont : 1) le faible pouvoir calorifique de ces charbons; 2) les variations considérables de leur pouvoir calorifique; 3) leur teneur élevée en soufre; et 4) le fait que l'emplacement et la configuration de nos réserves de charbon sont tels qu'il est impossible à l'heure actuelle d'appliquer des techniques extractives hautement mécanisées et, par conséquent, de diminuer les coûts d'exploitation.

La production annuelle de pétrole n'est actuellement que de 232 000 tonnes et suffit à peine à satisfaire la demande. Or, cette demande augmentera considérablement dans l'avenir, étant donné le processus rapide d'industrialisation et le développement des moyens de transport. Pour compléter sa production nationale de charbon et de combustibles liquides, le Pakistan est aujourd'hui obligé d'importer d'assez grandes quantités de charbon et de pétrole, et ces achats représentent déjà près de 15 pour cent du total de ses importations. Cette proportion ne fera qu'augmenter encore fortement, à moins que l'avenir ne nous apporte des sources d'énergie plus avantageuses.

Nous avons récemment découvert à Sui des réserves de gaz naturel contenant jusqu'à 90 pour cent de méthane. Toutefois, il s'agit là de quantités limitées et, bien qu'on puisse les utiliser tout d'abord pour produire de l'énergie — ceci avant que nos centrales hydrauliques entrent en service — on se propose de s'en servir également pour fabriquer des produits chimiques et des engrais.

Les ressources hydroélectriques du Pakistan sont situées aux confins des deux parties du pays, c'est-à-dire au nord du Pakistan occidental et à l'est du Pakistan oriental. Leur exploitation et leur utilisation intégrales sont donc limitées, d'une part à cause de l'insuffisance de la capacité d'emmagasinage, et d'autre part en raison des grandes distances qui séparent ces ressources des principaux centres de consommation.

Cependant, nous avons déjà adopté des plans d'aménagement hydroélectrique et les projets une fois terminés fourniront environ 600 mégawatts au Pakistan occidental et 160 mégawatts au Pakistan oriental. Les principales centrales, déjà en construction, sont situées à Warsak, Taunsa et Mangla au Pakistan occidental et à Karnafuli au Pakistan oriental. On prévoit que ces aménagements dureront une quinzaine d'années. Compte tenu de nos programmes actuels de développement économique et du potentiel hydroélectrique dont nous disposons, l'écart entre les besoins qui pourront être satisfaits et la demande effective atteindra sans doute 1 077 mégawatts en 1975 et 5 294 mégawatts en l'an 2000. Étant donné que nos ressources pétrolières, charbonnières et hydroélectriques sont limitées, l'énergie nucléaire semble la mieux indiquée pour combler cet écart et elle nous ouvre de nouvelles perspectives. Il convient d'ailleurs de souligner l'importance primordiale qu'a le facteur temps pour tous les pays insuffisamment développés. Nous estimons que l'utilisation de l'énergie nucléaire pourrait considérablement accélérer le développement économique de notre pays et des autres pays sous-développés, et qu'elle permettrait de réaliser dans un laps de temps très réduit des progrès qui, dans des conditions normales, exigeraient de nombreuses décennies.

Mon pays espère vivement que cette Conférence historique aura une importance particulière pour les pays insuffisamment développés et qu'il sera possible d'instaurer entre ces pays et les pays plus évolués un programme de collaboration grâce auquel les niveaux de vie pourront être relevés.

M. Bergmann (Israël) : On trouve exposés dans le mémoire présenté par la Commission de l'énergie atomique de l'État d'Israël sur les besoins en énergie de notre pays (P/772) deux points qui, à mon avis, s'inscrivent dans le cadre de notre discussion actuelle et qui concernent aussi bien Israël que d'autres pays se trouvant dans la même situation.

M. Mason a eu raison de souligner que, si les pays situés dans les climats tempérés doivent consommer de l'énergie pour le chauffage des locaux, cette nécessité ne se présente pas dans le cas des pays — pour la plupart insuffisamment développés — qui sont situés dans les régions tropicales et subtropicales. On pourrait naturellement invoquer que le rendement des activités entreprises dans cette deuxième catégorie de pays serait considérablement amélioré si l'on y prévoyait des installations de réfrigération ou de conditionnement d'air, installations elles-mêmes consommatrices d'énergie. Fait plus important encore, il faudrait pouvoir disposer de grandes quantités d'eau, et par conséquent d'énergie (pompage), pour mettre en valeur de nombreuses zones désertiques dans les pays tropicaux et subtropicaux, ce qui permettrait d'améliorer et d'augmenter la production alimentaire. En Israël, nous avons besoin de 1 200 kilowattheures par année pour mettre en culture un acre (0,4 hectare) de terrain, et l'énergie nécessaire pour l'irrigation représente un tiers du total de l'énergie électrique produite et consommée dans le pays.

En outre, nous estimons que la question de l'approvisionnement en eau à des fins agricoles et celle de la production d'énergie par les techniques nucléaires ne sont pas seulement parallèles, mais ont entre elles d'étroits rapports. Nous avons signalé dans notre mémoire les efforts, encore assez limités, que déploie nos pays pour améliorer son économie hydraulique. Il y a là, à notre avis, un problème important et qui peut intéresser de nombreux pays.

En second lieu, ainsi que M. Sevette l'a souligné dans son intéressant exposé, si les besoins en énergie des pays les plus évolués doublent tous les dix ans, en Israël ils doublent tous les quatre ans. Ce chiffre est assez exceptionnel, mais il se fonde sur une étude très serrée des conditions qui sont celles de notre pays et sur l'hypothèse que pour un État jeune tel que le nôtre, il n'est possible de faire des prévisions que pour les dix années — et non pas les cinquante années — à venir. Je crois que le taux selon lequel la consommation d'énergie double tous les quatre ans s'appliquera probablement à la majorité des pays dont la croissance économique ne se fait pas encore à un rythme soutenu.

Pour toutes ces raisons, ainsi que pour d'autres motifs qui sont exposés dans notre mémoire, nous estimons que l'État d'Israël ne peut se contenter des sources classiques d'énergie et qu'il devra, en plus, faire appel à l'énergie nucléaire. A cet effet, nous avons entrepris des recherches sur les questions qui peuvent intéresser un pays possédant des moyens limités, notamment sur l'extraction de l'uranium à partir des minerais pauvres et sur la possibilité de produire de l'eau lourde malgré le peu d'électricité dont nous disposons. J'espère que ces questions seront examinées plus à fond pendant cette Conférence et que nous aurons l'occasion d'exposer le résultat des travaux que nous avons effectués en ce domaine. Comme l'a dit le représentant du Pakistan, nous espérons que cette Conférence donnera naissance à un programme de collaboration entre les pays, grâce auquel les petits pays pourront plus facilement bénéficier des progrès réalisés dans les pays plus grands tout en montrant qu'ils sont capables, eux aussi, de fournir une contribution positive dans ce domaine qui intéresse au même titre tous les pays, petits et grands.

M. Eliezer (Ceylan) : Notre pays ne possède ni charbon ni pétrole. Nous devons importer le combustible qui alimente nos centrales thermiques.

Nous nous efforçons de mettre en valeur aussi rapidement que possible nos ressources hydroélectriques. Le potentiel hydroélectrique est d'un demi million de kilowatts. La partie centrale de Ceylan a une structure montagneuse qui, avec sa haute pénéplaine entourée d'une pénéplaine plus basse, se prête à l'installation de centrales hydrauliques; mais 10 pour cent seulement de ce potentiel ont été aménagés jusqu'à présent. Il est prévu d'installer au cours des cinq années à venir des centrales hydrauliques totalisant une puissance de 200 000 kilowatts, ce qui représentera un grand apport énergétique pour le pays.

Cependant, même lorsque la totalité des ressources hydroélectriques aura été aménagée, le niveau de la consommation annuelle par habitant ne dépassera pas 100 kilowattheures, ce qui est très faible par rapport à la plupart des pays. Dans certaines plantations de thé, dans des fabriques d'huile de coco et de caoutchouc, ainsi que dans d'autres entreprises industrielles, on utilise l'énergie fournie par des installations hydroélectriques et thermiques; mais d'autres entreprises devront encore être électrifiées dans l'avenir, ainsi qu'une partie des chemins de fer.

Plusieurs nouvelles industries seront créées d'ici quelques années et elles imposeront de nouveaux besoins en énergie. L'énergie hydroélectrique ne peut subvenir à tous nos besoins étant donné que son plafond est limité et qu'elle se trouve cantonnée dans certaines régions du pays, le centre et le centre-sud par exemple. Or, pour diverses raisons, de nombreuses industries ont été établies au nord et à l'est et elles ont besoin d'être alimentées en énergie. Dans ces conditions, et à l'instar d'autres pays insuffisamment développés, nous espérons pouvoir faire appel à l'énergie nucléaire. Notre sous-sol contient certains gisements minéaux qui pourraient être utiles à une industrie nucléaire, mais il nous reste encore à en déterminer les quantités exactes. Nous espérons que grâce à la collaboration internationale l'énergie nucléaire apportera prospérité et paix à la population sous-alimentée de notre pays.

Le PRÉSIDENT : J'estime que grâce aux résumés que nous venons d'entendre sur des mémoires préparés dans différentes parties du monde, notre étude générale a été excellente et très complète. Sans être particulièrement au courant des questions traitées, il me semble que l'on n'avait jamais rassemblé sur ce sujet autant de renseignements émanant de sources autorisées. Cette documentation devrait servir de base pour des études ultérieures quantitatives portant sur ces problèmes, ainsi que sur toutes les données qui nous ont été présentées. Je puis cependant me tromper, et il y a peut-être des experts qui n'ont pu nous faire part de tout ce qu'ils auraient aimé dire. Si un des orateurs précédents désire développer ses remarques, il peut prendre la parole pendant quelques instants. Étant donné que la discussion semble épuisée, je déclare que la séance est levée.

Séance 3.2

INVESTISSEMENTS NÉCESSAIRES DANS LE DOMAINE DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

LISTE DES MÉMOIRES

			Pages
P/391	Les investissements nécessaires pour l'exploitation de l'énergie nucléaire	J. M. Hill et S. W. Joslin	333
P/477	Les investissements nécessaires pour l'exploitation de l'énergie nucléaire	W. K. Davis	337

Les investissements nécessaires pour l'exploitation de l'énergie nucléaire

par J. M. Hill* et S. W. Joslin*

L'étude des investissements nécessaires à la création d'une industrie atomique ne peut se faire que sur la base d'une analyse très approfondie; exposer simplement le problème tel qu'il se présente financièrement au Royaume-Uni n'offrirait que peu d'intérêt. En effet, les dépenses que devra engager tout pays désireux de créer une telle industrie dépendront de nombreux facteurs et le montant que cet État sera disposé à consacrer aux travaux de recherches et d'application ne sera pas le moindre. Ces travaux peuvent effectivement absorber des sommes très importantes, surtout si l'on envisage la construction de grandes piles prototypes, qui, au stade expérimental, ne sont pas rentables. Il importe aussi de savoir dans quelle mesure l'État en question entend que ce développement dépende de ses seules ressources et dans quelle mesure il est disposé à se procurer à l'étranger les éléments qui lui font défaut.

LA SITUATION ACTUELLE AU ROYAUME-UNI

Nous examinerons pour commencer la situation actuelle du Royaume-Uni. La construction des deux premières génératrices nucléaires qui est en cours à Calder Hall est maintenant assez avancée pour ne plus exiger de grosses dépenses; tout au plus aura-t-on à surmonter telle ou telle difficulté secondaire qui risque de surgir en cours d'exécution. Il serait donc possible de commander des génératrices nucléaires du type de celles de Calder Hall au prix d'environ 15 millions de livres sterling pour une centrale comprenant deux piles, les générateurs connexes et les installations auxiliaires. L'expérience acquise au cours de la construction de ces piles nous a permis d'envisager avec confiance les réalisations futures.

Des centrales nucléaires vont être construites dans deux ans pour le compte de la Direction centrale de l'électricité. A ce moment, il sera sans doute possible d'établir les plans de centrales dont le prix de revient sera d'environ 120 livres sterling par kilowatt installé, somme qu'il convient d'élever à 150 livres pour tenir compte du prix de revient du combustible. Ces chiffres ont été calculés en admettant qu'une centrale électronucléaire coûtant environ 18 millions de livres sterling pourra produire environ 150 MW; le kilowatt revient ainsi au double de ce qu'il coûte dans une centrale de type classique consommant du charbon ou du pétrole.

Ces centrales seront construites par l'industrie privée pour le compte de la Direction centrale de l'électricité. En d'autres termes, la construction et le financement de ces centrales s'effectueront dans une large mesure, comme une opération commerciale courante. Il est d'ores et déjà possible d'acheter de petites piles de recherche et, de toute évidence, le temps n'est plus loin où il sera possible d'acheter des génératrices nucléaires aux constructeurs dans les principaux pays producteurs d'énergie atomique.

Achat d'installations prêtes à fonctionner

Pour les pays dont les ressources industrielles sont limitées, la seule possibilité est d'acheter une génératrice nucléaire complète prête à fonctionner. C'est la méthode que ces pays adoptent à l'heure actuelle pour se procurer leurs centrales électriques, leurs raffineries de pétrole ou tout autre équipement industriel important. Dans le cas d'une centrale atomique, ce système implique en outre l'achat du combustible prêt à l'emploi, et l'envoi des éléments irradiés à l'étranger où ils seront traités en vue de leur récupération. Le moment où, pour ces pays, il sera rentable de faire l'achat d'une centrale atomique ainsi équipée dépendra de nombreux facteurs économiques. Comme nous l'avons indiqué plus haut, le prix de revient du kilowatt fourni par les premières centrales nucléaires commerciales qui seront construites au Royaume-Uni atteindra probablement le double de celui des centrales de type classique, mais il est probable que ce prix baissera rapidement jusqu'à n'être plus, peut-être, que de 50 pour cent au-dessus de son prix de revient dans les centrales classiques. Il faut tenir compte d'autre part du taux d'intérêt, des dividendes à verser et du coût des combustibles. Quoi qu'il en soit, la méthode qui consiste à acheter une génératrice nucléaire complète et à passer des contrats pour les approvisionnements en combustible frais

Original : anglais.

* Direction de l'énergie atomique du Royaume-Uni, Risley.

et le traitement des éléments irradiés, doit permettre à n'importe quel pays d'entreprendre l'utilisation pratique de l'énergie atomique avec un minimum de mise de fonds, de l'ordre de 20 millions de livres sterling pour une centrale électrique de puissance normale, ou de la moitié de cette somme, si l'on peut se contenter d'une centrale moins grande dont le prix de revient par kilowatt serait un peu plus élevé.

Construction de génératrices nucléaires sous licence

Un pays plus industrialisé, sans vouloir se charger lui-même de tous les travaux de mise au point nécessaires, préférera sans doute construire ses propres piles. Dans ce cas, il lui sera loisible (du moins est-ce fort probable) de construire des piles sous licence, tout comme il est possible actuellement de construire de nombreux éléments industriels sous licence. La construction d'une telle pile peut être divisée en deux parties : la première comprend la construction des éléments de la centrale nucléaire, pour lesquels on peut recourir aux techniques classiques. D'une façon générale, le pays qui est en mesure de construire des centrales de type classique est à même d'entreprendre, dans une très large proportion, la construction d'une centrale nucléaire. On peut évaluer à un tiers du coût total des travaux les frais d'installation des générateurs et de l'équipement auxiliaire normal; comme il s'agit de travaux du même ordre que lors de la construction d'une centrale classique, il n'est pas nécessaire d'en parler ici. La pile elle-même nécessite des matériaux de construction usuels, tels que briques, du ciment et des profilés d'acier, qui ne représentent qu'une proportion insignifiante de la capacité de production de la plupart des pays industrialisés.

La seconde étape consiste à se procurer les matières spéciales nécessaires aux piles. Le graphite et l'eau lourde sont, par exemple, des éléments indispensables si l'on envisage la construction de piles industrielles fonctionnant à l'uranium naturel. La construction d'une pile du type de Calder Hall demande plus de 2 000 tonnes de graphite de qualité supérieure. Or, il peut être difficile de se procurer de telles quantités de graphite à bref délai. Certes, si l'on passait commande dès aujourd'hui, le problème serait vite résolu; mais si la construction de piles utilisant le graphite comme élément ralentisseur se généralise, la demande risque de largement dépasser l'offre. Il en va de même en ce qui concerne l'eau lourde. Admettons un instant que seule l'Angleterre décide maintenant de remplacer par des piles industrielles à eau lourde toutes ses centrales de type classique; la production mondiale d'eau lourde n'y suffirait pas! Aussi pourrait-il être fort difficile de s'assurer les fournitures nécessaires dans des délais raisonnables si la construction de telles piles se généralisait.

Du point de vue technique, les pays qui construiront des piles sous licence auront besoin de cuves soudées de qualité supérieure, de compresseurs spéciaux et de machines électriques. En principe, n'importe quel pays fortement industrialisé est à même de fournir ces éléments, mais là encore, on peut redouter un certain embouteillage des commandes jusqu'à ce que les diverses industries manufacturières aient la possibilité de développer telle ou telle production particulière.

Travaux indépendants de recherche et d'application

L'achat de centrales nucléaires complètes, ou la construction de centrales sous licence, ne présentera pas d'intérêt pour tous les pays. Pour se trouver à l'avant-garde du progrès dans une industrie quelconque, un pays doit nécessairement faire lui-même certains travaux de recherche et d'application et concevoir lui-même les modèles qu'il se propose d'adopter. De nombreux pays désireront certainement suivre cette voie.

On peut toutefois se demander dans quelle mesure un pays peut être en ce domaine indépendant des autres et s'en remettre à ses propres ressources. A cet égard, il est intéressant de rappeler ici les expériences du Royaume-Uni.

Par la force des choses, nous n'avons pas eu d'autre choix que de mettre notre industrie atomique nationale sur pied par nos propres moyens. Voilà dix ans que nous y travaillons. Nous n'avons actuellement en service qu'un seul type de génératrice nucléaire de grande puissance, les piles Windscale à refroidissement par air. La construction des deux génératrices nucléaires de Calder Hall est très avancée, et nous avons entrepris la construction de la pile autorégénératrice à neutrons rapides de Dounreay. Au total, le montant des frais entraînés par l'établissement de ce programme et des travaux préliminaires a dépassé de beaucoup le coût de la construction effective des piles elles-mêmes; en effet, il n'aurait pas été possible d'établir les plans des génératrices nucléaires de Calder Hall et de les construire sans expérience préalable. Nous avons passé par diverses étapes : la construction des piles GLEEP, BEPO, celle des piles de Windscale et, maintenant, celle des piles de Calder Hall; or, chacune de ces piles est plus puissante et plus complexe que celle qui l'a précédée et exige davantage des métallurgistes. Quant au laboratoire de recherches atomiques de Harwell, il est bien connu et l'on s'accorde à reconnaître qu'il s'agit d'un établissement important et bien équipé. Comme son nom l'indique, ses travaux sont presque entièrement consacrés au développement de l'énergie nucléaire, et la mise au point des piles a absorbé une bonne part de son activité. Cette énumération permet de se faire une idée des dépenses en temps et argent auxquelles un pays doit consentir pour mettre au point par ses seuls moyens un ensemble nucléaire, et il convient de ne pas sous-estimer les efforts que cela représente.

En conclusion, pour tout pays qui se lance dans la production d'énergie atomique, le problème se pose ainsi : est-il disposé à acheter des installations complètes de production d'énergie nucléaire ou désire-t-il entreprendre des travaux de recherche et de mise au point pour son propre compte? Sa décision dépendra évidemment des ressources financières et matérielles qu'il est disposé à investir.

LES INSTALLATIONS AUXILIAIRES DES CENTRALES NUCLÉAIRES

Nous avons examiné jusqu'ici les diverses voies qui s'offrent à un pays désireux de construire ses génératrices nucléaires mais nous n'avons pas traité des installations auxiliaires qui peuvent exiger des investissements énormes au stade initial d'un programme de production d'énergie atomique.

Si on ne dispose pas d'uranium enrichi et qu'on doive se borner à utiliser de l'uranium naturel, il ne sera probablement possible de construire que deux types de génératrices nucléaires : la pile à ralentisseur en graphite et refroidissement au gaz, et la pile à ralentisseur en eau lourde. Si l'on veut s'écarter de ces deux voies, il est presque certain que l'on devra se procurer un combustible enrichi et, dès lors, une nouvelle question se pose : doit-on acheter le combustible enrichi à l'un des pays qui en possèdent ou construire une installation de diffusion? Pour de nombreuses raisons, cette seconde solution semble préférable. Elle laisse infiniment plus de liberté dans la conception de la pile. Même si celle-ci doit être en principe alimentée à l'uranium naturel, la possibilité d'enrichir légèrement le minerai donne une beaucoup plus grande latitude à l'ingénieur chargé d'établir les plans et lui permet, de surcroît, de moins se préoccuper du volume critique de la pile.

Mais la construction d'une installation de diffusion est une entreprise considérable; pour enrichir l'uranium jusqu'à 90 pour cent d'uranium-235, par exemple, il faudrait très probablement y consacrer autant de travaux préliminaires qu'à la construction de la pile proprement dite, et il est presque impossible d'en évaluer le prix de revient car ce prix est largement fonction de l'importance de la production prévue. Il ne semble guère possible, toutefois, d'envisager une dépense inférieure à 20 ou 30 millions de livres sterling pour une installation d'importance raisonnable. D'autre part, on ignore pendant combien de temps il sera nécessaire de disposer d'uranium enrichi; dans ces conditions, est-il bien utile de construire une usine de diffusion qui fonctionnerait uniquement à titre auxiliaire dans un programme de production d'énergie? Les piles qui semblent devoir être le plus rentables sont toutes des piles régénératrices qui produisent du plutonium ou de l'uranium-235. Du moment que ces matières fissiles seront produites en grandes quantités, la demande de l'uranium-235 se maintiendra-t-elle à un niveau qui permettrait de continuer l'exploitation de l'usine de diffusion ?

Les autres installations auxiliaires que requiert un programme de production d'électricité de source nucléaire sont une usine de combustible et une usine de séparation pour le traitement des combustibles irradiés. La construction de la première ne représente pas une dépense énorme et, pour quelques millions de livres, on mettra sur pied une usine de combustibles ayant une très grande capacité de production. Cette installation sera appelée à résoudre certains problèmes dont le plus important n'est pas la production d'uranium-métal pur, mais la conversion de ce métal en cartouches fabriquées dont la combustion soit satisfaisante dans les conditions posées par le fonctionnement de la pile. Si nous envisageons un avenir un peu plus lointain, nous constatons que les cartouches de combustible devront contenir de l'uranium-235 ou du plutonium aussi bien que des matériaux fertiles, et la fabrication des cartouches de combustible contenant ces substances toxiques posera probablement de graves problèmes.

Il sera sans doute possible d'acheter des cartouches de combustible fabriquées, et le transport de ces substances inactives ne devrait présenter aucune difficulté. En revanche, le transport de centaines de tonnes de cartouches fortement irradiées pose un problème beaucoup plus grave. Il est évidemment possible de procéder de la sorte au début de la réalisation d'un programme, alors que seules fonctionnent une ou deux piles, mais au fur et à mesure que l'entreprise se développe, il faudrait disposer d'installations de séparation à proximité des piles.

CONCLUSIONS

En conclusion, nous pouvons déclarer que les investissements nécessaires à la mise sur pied d'une industrie de production d'énergie nucléaire sont les suivants :

Si un pays est disposé à acheter à l'étranger les plans de piles ayant fait leurs preuves et à passer des contrats pour ses approvisionnements en combustibles nucléaires et le traitement de ces combustibles, le coût en capital sera simplement celui de la centrale nucléaire et pourra varier entre les limites suivantes : le double environ du prix d'une centrale classique dans un très proche avenir et, peut-être, le prix d'une centrale classique majoré de 50 pour cent seulement au cours des dix prochaines années.

Si en revanche un pays désire se lancer dans un programme de réalisations autonomes mais se limite toutefois à des types de piles considérés actuellement comme relativement orthodoxes, il devra évidemment consentir des dépenses en capitaux plus élevées à la phase initiale, mais il peut s'attendre à obtenir des résultats plus intéressants avec le temps.

Enfin, plus le programme est étendu, plus les dépenses seront élevées et plus longue sera la période qui s'écoulera avant qu'on puisse en recueillir des bénéfices. Pour fixer des normes, disons que le

pays qui s'efforce de ne compter que sur lui-même en ce qui concerne la conception et la mise au point des piles, la préparation de l'uranium et son approvisionnement en matériaux enrichis, doit disposer d'une organisation comparable à celle qui existe au Royaume-Uni. Quant au pays qui tente de mener ses travaux de recherches jusqu'à la création de prototypes, il aura besoin de ressources comparables à celles dont disposent les États-Unis d'Amérique.

Les investissements nécessaires pour l'exploitation de l'énergie nucléaire

par W. Kenneth Davis *

L'utilisation pratique et massive d'énergie nucléaire en vue de produire du courant électrique implique de vastes immobilisations de capitaux sous forme d'investissements. On s'en convainc davantage encore si l'on considère toutes les phases de l'industrie nucléaire — de l'extraction des minerais contenant de l'uranium et du thorium jusqu'au traitement chimique des combustibles irradiés. En effet, cette industrie a pour caractéristique évidente de ne pouvoir s'accommoder d'un développement réduit et d'investissements limités. Il n'est cependant pas nécessaire de mettre sur pied des entreprises industrielles aussi vastes que celles des États-Unis d'Amérique ou du Royaume-Uni pour réaliser des progrès importants et utiles.

Par la mise en commun de ce qu'ils ont appris et réalisé, par l'échange des services, des matières premières et des biens d'équipement, les États pourront réduire l'importance des capitaux à investir. Aux États-Unis, nous croyons fermement que l'époque est proche où notre pays pourra mettre à la disposition du reste du monde le fruit des importants investissements qu'il a consacrés à la production d'énergie nucléaire, et réduire ainsi sensiblement le montant des investissements auxquels les autres pays devront procéder.

Nous nous proposons, dans le présent rapport, d'examiner l'ordre de grandeur des investissements qu'exige une industrie de l'énergie nucléaire telle que celle qui se crée aux États-Unis d'Amérique. Nous ne retiendrons que les dépenses ayant trait à la création et à l'utilisation de l'énergie nucléaire destinée à la production de courant électrique commercial. En raison de la complexité du problème, de la très grande variété des génératrices nucléaires industrielles, des complexes dans lesquels elles sont utilisées et aussi du caractère fragmentaire de l'information et de l'expérience acquises jusqu'ici dans ce domaine, nous devrons borner notre exposé à des généralités. Il devrait être possible, dans quelques années, d'examiner d'une façon beaucoup plus concrète et plus précise de nombreux aspects de l'utilisation des génératrices nucléaires dans l'industrie.

Original : anglais.

* Commission de l'énergie atomique des États-Unis d'Amérique.

Les investissements nécessaires à l'industrie de l'énergie nucléaire dans son ensemble portent en particulier sur les postes suivants : recherches, extraction, concentration et préparation du minerai contenant de l'uranium et du thorium, enrichissement de l'uranium, fabrication des éléments combustibles, chaudières nucléaires et éléments des centrales, traitement du combustible, élimination des déchets et production de substances spéciales telles que le graphite, le zirconium et l'eau lourde pour les piles. Il faut également tenir compte du coût des laboratoires de recherche et d'application ainsi que des dépenses qu'entraînent les réalisations indispensables, notamment les premières usines pilotes et les prototypes de génératrices nucléaires et de centrales auxiliaires.

ÉTAT ACTUEL DES CONNAISSANCES

Il doit être bien entendu que nous ne pouvons encore répondre, dans bien des cas, aux nombreuses questions techniques et économiques soulevées par l'énergie nucléaire. Nous sommes cependant convaincus que le programme en cours d'exécution nous permettra de trouver des réponses. Nous sommes persuadés que l'énergie nucléaire pourra soutenir la concurrence de l'énergie produite par les sources classiques, même aux États-Unis où subsistent de très grandes réserves de charbon, de pétrole et de gaz, ainsi qu'une importante capacité hydraulique encore inexploitée. Si l'optimisme qui règne actuellement aux États-Unis est tout à fait légitime, il ne doit cependant pas nous dissimuler le fait que de nombreux problèmes de technologie et de financement restent à résoudre.

Jusqu'ici, le programme de construction de génératrices nucléaires aux États-Unis a surtout porté sur des piles destinées à de grandes centrales produisant jusqu'à 250 000 kilowatts plutôt que sur des centrales de moindre importance qui trouveraient leur utilisation dans d'autres parties du monde.

PROGRAMME DE CONSTRUCTION DE GÉNÉRATRICES NUCLÉAIRES AUX ÉTATS-UNIS

La Commission de l'énergie atomique des États-Unis d'Amérique a pour premier objectif de faire

progresser la technologie des génératrices nucléaires appartenant à un ou plusieurs types, jusqu'au moment où elles pourront soutenir la concurrence des installations existant dans les centrales de type classique, au moins dans certaines régions des États-Unis. Pour être en état de soutenir cette concurrence, une génératrice nucléaire devra pouvoir produire de l'énergie au même prix de revient qu'une centrale de type classique construite au même endroit et avec les mêmes moyens financiers. La centrale nucléaire ne sera créditée que d'une « valeur de combustible » pour toute matière fissile qu'elle produira accessoirement.

La Commission de l'énergie atomique s'intéresse aussi aux progrès de la technique générale en ce qui concerne les éléments des contrôles où doivent fonctionner les génératrices nucléaires, ainsi qu'au perfectionnement de génératrices nucléaires de types nouveaux et à la mise au point de piles destinées à des applications spéciales. Dans cet ordre d'idées, on peut citer les petites génératrices nucléaires et les piles utilisées pour procéder à certains traitements chimiques et pour produire de la chaleur.

Notons que la Commission de l'énergie atomique exerce encore son activité dans le domaine de la recherche et de l'élaboration des techniques nouvelles. La construction et l'exploitation de prototypes et de grandes piles sont par contre essentiellement du ressort de l'industrie américaine. Tant que les données techniques et économiques ne seront pas plus précises, la Commission de l'énergie atomique et l'industrie privée se doivent d'avoir des programmes communs; mais même dans ces programmes communs, l'initiative revient à l'industrie privée, et ces programmes sont exécutés de façon à laisser à cette dernière la plus grande initiative possible, qu'il s'agisse de questions techniques ou économiques.

Le programme des États-Unis pour la mise au point de la technique des piles industrielles (United States Power Reactor Technology Program, que l'on appelle parfois aussi le programme de cinq ans) est actellemment connu de tout le monde. Un programme analogue pour la mise au point de piles de démonstration est en voie d'élaboration. Ces projets sont conformes aux conceptions générales exposées plus haut, et au cours de la présente Conférence, d'autres orateurs en décriront l'économie avec plus de détails.

Les programmes de la Commission de l'énergie atomique sont soumis à un examen critique constant en vue de trouver de nouveaux moyens d'atteindre les objectifs recherchés. On attache actuellement une importance de plus en plus grande à la mise au point de piles produisant de 5 000 à 25 000 kilowatts et au progrès des traitements chimiques. Les essais de fonctionnement auxquels on envisage de soumettre les cœurs de piles font en ce moment l'objet d'études préliminaires; ces essais seront très étendus et devraient permettre d'augmenter la marge de sécurité du fonctionnement des génératrices nucléaires. La mise au point de piles convenant particulièrement à la transformation du charbon en gaz de synthèse (en vue de la fabrication de combustibles liquides) et à d'autres utilisations du domaine de la transformation directe par procédés chimiques, approche de sa phase finale. La construction de piles destinées à propulser les navires de commerce est actuellement à l'étude et un premier prototype expérimental (qui ne sera pas rentable) sera peut-être en service vers 1958.

Le programme de cinq ans et le programme de mise au point des piles de démonstration permettront probablement aux États-Unis de disposer, vers 1960, d'une capacité nucléaire de production d'électricité de l'ordre de 750 000 à 1 000 000 de kilowatts; ces réalisations représenteront un investissement de 250 à 350 millions de dollars. Si ces centrales fonctionnent de façon satisfaisante et si les programmes de recherches techniques aboutissent à de bons résultats, la cadence à laquelle les centrales électronucléaires seront installées s'accélérera assez rapidement, et même très rapidement; il suffira pour cela de gagner la confiance générale à l'égard de la réussite de ces projets.

Il ne nous paraît pas déraisonnable d'estimer que vers 1975 ou 1980 les États-Unis disposeront peut-être d'une capacité totale de production d'énergie de source nucléaire égale à celle de toutes nos centrales électriques actuelles, soit 100 millions de kilowatts. Une telle capacité représenterait des investissements de l'ordre de 20 milliards de dollars, chiffre qui serait fortement augmenté si l'on y ajoutait le montant des investissements consacrés aux installations auxiliaires.

A ce propos, il n'est pas inutile de rappeler que notre première grande génératrice nucléaire productrice d'énergie électrique, la pile à eau sous pression de Shippingport, Pensylvanie, ne commencera à fonctionner qu'en 1957.

REMARQUES GÉNÉRALES SUR LE MONTANT DES INVESTISSEMENTS

Avant d'entamer l'analyse des investissements correspondant aux divers éléments d'un ensemble de production d'énergie par pile, il peut valoir la peine de présenter quelques observations sur la nature des investissements et sur leur importance relative dans l'économie de l'énergie nucléaire. Ces observations peuvent être fort utiles, étant donné que l'on considère forcément les mêmes investissements en capital de manière très différente dans chaque pays. Le prix de revient de l'énergie dans un pays ne peut être comparé à son prix de revient dans un autre, à moins de réduire à un commun dénominateur les systèmes financiers des divers pays.

CHARGES FIXES AFFÉRENTES AUX INVESTISSEMENTS EN CAPITAL

Quand on calcule le prix de revient du courant électrique, on tient compte des frais financiers en

tant que charges fixes ; c'est donc la somme des charges fixes et des frais d'exploitation qui détermine le prix de revient du produit — dans ce cas particulier, le prix du courant électrique.

Une des premières considérations dont il faut tenir compte est la durée de vie de la centrale ou de ses cartouches. Il faut réserver des sommes suffisantes pour l'amortissement, de façon à pouvoir remplacer la centrale lorsqu'elle sera parvenue au terme de sa vie utile. On admet généralement que les sommes ainsi réservées sont placées de manière à rapporter un intérêt du même ordre de grandeur que le profit de l'entreprise à laquelle elles sont destinées. Ce genre d'opération est un cas particulier du service d'amortissement; il vise à constituer un « fonds de réserve pour amortissement ». Les centrales à vapeur du type classique sont censées avoir, en moyenne, une vie utile de vingt-cinq à trente ans. Par conséquent, une somme équivalant à 1,5 ou 2 pour cent du montant des investissements en capital sera mise de côté chaque année, au titre du service d'amortissement, pour constituer ce fonds de réserve.

Rien ne permet encore d'affirmer que les chaudières nucléaires ou leurs cartouches auront une vie utile aussi longue que celle des chaudières de type classique et, pendant quelques années encore, il sera impossible de déterminer leur durée. Aussi, les réserves constituées pour l'amortissement des centrales nucléaires, ou tout au moins de certains de leurs éléments, peuvent-elles parfaitement dépasser 2 pour cent par an, et il peut être tout à fait normal d'aller jusqu'à 4 à 5 pour cent pendant les premières années de fonctionnement.

Outre la durée de vie utile, il faut tenir compte du vieillissement des installations. A un moment donné, le procédé utilisé ou l'équipement installé peuvent être d'un rendement si faible ou d'une exploitation si coûteuse, par comparaison avec un procédé ou un équipement nouveau, que leur remplacement s'impose. Le remplacement ne se justifie que par un progrès technique indiscutable; mais le vieillissement des installations se manifeste encore de bien d'autres manières dans l'industrie de production du courant électrique. Par exemple, les centrales neuves et conçues d'après les principes modernes sont généralement celles dont l'exploitation est la moins onéreuse; aussi les exploite-t-on au maximum pendant leurs premières années d'existence. A mesure que l'on construit de nouvelles centrales d'une conception plus moderne, on utilise de plus en plus les anciennes centrales pour fournir la charge supplémentaire aux heures de pointe, et de moins en moins pour fournir la charge de base.

Il serait donc faux de fonder le bilan économique de l'énergie nucléaire sur les seules évaluations initiales des coefficients d'utilisation. D'après l'estimation faite par la General Electric Company, il faudrait prévoir un coefficient d'utilisation global de 43 pour cent pour une centrale neuve de type classique dont la conception tiendrait compte de ces considérations, et un coefficient d'utilisation permanent de 50 pour cent pour les centrales nucléaires.

Le public qui place son argent dans les centrales, en achetant soit des obligations, soit des actions, s'attend à ce que ces placements rapportent un dividende. Lorsqu'il s'agit d'obligations, le taux d'intérêt est fixe : il est généralement de 3 ou 3,5 pour cent environ aux États-Unis (bien que le Gouvernement puisse, s'il le désire, trouver des capitaux à long terme à un taux à peine supérieur à 2 pour cent). Une autre partie du capital est constituée par des actions ordinaires. Pour les services d'intérêt public, aux États-Unis, la Securities & Exchange Commission, organisme régulateur des investissements, exige que 40 pour cent au moins de l'argent souscrit pour une entreprise nouvelle, quel que soit son caractère, le soit sous forme de capital-actions. (Cette règle ne souffre d'exceptions que dans des circonstances très particulières, tel qu'un contrat de garantie assurant la vente du courant produit.)

Les dividendes servis sur le capital-actions sont prélevés sur les bénéfices nets, déduction faite des impôts sur le revenu. Aux États-Unis, les impôts sur les revenus des sociétés sont d'environ 52 pour cent; de plus, certains États prélèvent un impôt de 3 ou 4 pour cent, qui vient s'ajouter à l'impôt fédéral. On estime qu'un dividende de 9 pour cent environ sur le capital-actions, après paiement des impôts, est un taux très acceptable. Il faut donc qu'un service public réalise un profit d'environ 19 ou 20 pour cent sur son capital-actions et de 9 à 10 pour cent brut sur le total des capitaux investis, pour pouvoir servir un intérêt aux acheteurs d'obligations et un dividende équitable aux actionnaires. En ce qui concerne d'autres activités connexes, telles que les industries extractives, la fabrication des éléments combustibles, les traitements chimiques, etc., des taux de dividendes encore plus élevés paraissent justifiés, étant donné la durée de vie plus brève des procédés techniques et des installations, et la nature des risques en cause.

Les primes d'assurance destinées à couvrir la centrale et ses installations, et les impôts fonciers dont ces installations sont frappées sont aussi considérés, en général, comme des charges fixes afférentes aux investissements en capital. Les assurances souscrites sur les centrales de type classique donnent généralement lieu au paiement de primes peu élevées, une fraction de 1 pour cent du capital assuré, mais ces primes peuvent être beaucoup plus lourdes s'il s'agit de centrales nucléaires. Dans ce domaine-là, nous avouons notre manque d'expérience. Quant aux impôts fonciers, ils sont en moyenne de 1 à 3 pour cent par an pendant la durée de vie de la centrale.

Ordre de grandeur des charges fixes

Aux États-Unis, les charges fixes afférentes aux investissements en capital peuvent varier très largement selon les industries.

Dans l'industrie chimique, par exemple, où la plus grande partie du capital est souscrite sous forme de capital-actions et où les risques sont grands, les charges fixes sont très élevées. En revanche, elles sont peu importantes dans l'industrie de production d'électricité, où les tarifs de vente sont l'objet d'une minutieuse réglementation. Les charges sont même parfois très faibles lorsqu'il s'agit d'usines construites par les pouvoirs publics ou bénéficiant de contrats qui assurent la vente aux pouvoirs publics.

Étant donné la variété des cas, il n'est guère possible de citer des chiffres précis à titre d'exemple de charges fixes. On peut toutefois mentionner quelques valeurs, de caractère représentatif, qui montreront peut-être l'ampleur des variations et sur lesquelles pourra s'appuyer la suite de notre exposé.

Les chiffres que nous citerons pour montrer l'ordre de grandeur des charges fixes aux États-Unis ne seront guère valables dans d'autres pays, et cela pour de nombreuses raisons : par exemple les différences qui existent d'un pays à l'autre, dans les méthodes de financement, dans la fiscalité, dans la réglementation plus ou moins étendue applicable aux bénéfices et aux charges et dans l'importance des dividendes qu'attendent les actionnaires. Les chiffres que nous donnons ont été calculés d'après les hypothèses suivantes : 1) impôts *ad valorem* de 2 pour cent par an; 2) assurance immobilière et charges diverses de 0,2 pour cent par an; 3) emprunt lancé par le secteur privé sous forme d'obligations à 3 $^1/_2$ pour cent; 4) emprunt d'État à 2 $^1/_4$ pour cent; 5) impôts fédéraux et locaux sur le revenu égaux à 54 pour cent du revenu avant la perception des impôts; 6) amortissement calculé sous la forme d'un fonds d'amortissement, d'après les données moyennes du rendement financier de l'entreprise.

Dans les cas énumérés au tableau 1, l'exemple *a* pourrait être celui d'une usine de traitements chimiques dont l'exploitation comporte des risques très élevés mais où la mise en application d'idées nouvelles peut rapporter des bénéfices importants. Le taux des charges devrait être d'environ 50 pour cent par an — voire plus dans certains cas.

L'exemple *b* est représentatif d'une entreprise privée dont l'activité est d'intérêt public; les tarifs de vente et les bénéfices y sont réglementés. Les organismes régulateurs exigent qu'un minimum de 40 pour cent des investissements soit représenté par le capital-actions. Il en résulte une charge fixe annuelle de l'ordre de 14 pour cent.

Dans l'exemple *c*, nous avons une autre entreprise dont l'activité est d'intérêt public et qui vend son courant par contrat à l'État, les organismes régulateurs autorisant une proportion très faible de capital-actions dans les investissements. On voit que les charges fixes y sont notablement réduites et n'atteignent que 9 pour cent par an environ.

L'exemple *d* est celui de l'entreprise entièrement financée par les pouvoirs publics. Le taux d'intérêt y est moins élevé, il n'existe ni capital-actions, ni taxes *ad valorem*, ni primes d'assurance. Les charges fixes ne s'élèvent qu'à environ 5 $^1/_4$ pour cent par an.

Tableau 1

Exemples de charges fixes exprimées en pourcentage des investissements

	Cas			
	a	*b*	*c*	*d*
Financement par émission d'actions	100	40	5	0
Financement par émission d'obligations	0	60	95	0
Financement par le trésor public	0	0	0	100
Total, en pourcentage	100	100	100	100
Rendement financier du capital-actions, en pourcentage	20	9	9	0
Durée de vie de l'usine, en années	10	25	25	25
Rendement net				
Capital actions	20,0	3,6	0,45	0
Obligations ou intérêts	0	2,1	3,32	2,25
Total, en pourcentage	20,0	5,7	3,77	2,25
Charges fixes en pourcentage				
Taxes *ad valorem*	2,0	2,0	2,0	0
Assurance	0,2	0,2	0,2	0
Obligations	0	2,1	3,32	0
Prêt de l'État	0	0	0	2,25
Capital-actions avant la perception des impôts	43,5	7,83	0,98	0
Total avant prélèvement pour amortissement	45,7	12,13	6,50	2,25
Fonds de réserve pour amortissement	3,8	1,90	2,48	3,02
Total des charges fixes, en pourcentage	49,5	14,03	8,98	5,27

Importance des charges fixes

Puisque les charges fixes sont fonction de facteurs si divers, il faut compter avec d'importantes différences qui peuvent faire varier très sensiblement le prix de revient de l'énergie.

Prenons le cas d'une centrale nucléaire dont la construction est revenue à 250 pour cent par kilowatt de puissance installée, et qui produit 7 000 kilowattheures par an et par kilowatt de puissance installée; considérons les différences qui affecteront le coût de l'énergie selon que cette centrale aura été financée comme une entreprise industrielle ordinaire grevée de 14 pour cent de charges fixes, ou financée par les pouvoirs publics et grevée de 5 $^1/_4$ pour cent de charges fixes. Dans le premier cas, les charges fixes sur les investissements du capital seraient de 5 millièmes de dollars par kilowattheure, et dans le second cas, de 1,87 millième de dollars

par kilowattheure, soit une différence de 3,13 millièmes de dollars par kilowattheure, représentant peut-être 30 ou 40 pour cent du prix de revient total du courant produit.

Ces chiffres varient évidemment avec le coût de construction de la centrale ou de l'élément de la génératrice nucléaire considérée et aussi avec la production annuelle envisagée par kilowatt de puissance installée. Mais ils démontrent en tout cas combien il est important de bien calculer le taux des charges ou du financement lorsqu'on veut comparer les prix de revient du courant produit dans deux centrales nucléaires.

En particulier, l'on examine des chiffres valables pour un pays donné, où la plus grande partie des entreprises industrielles sont financées par le secteur privé, en les comparant à ceux d'un autre pays où elles sont entièrement entre les mains de l'État; on peut escompter que les différences entre les charges fixes se répercuteront sur tous les réseaux de génératrices nucléaires, et par là, affecteront la plupart des éléments entrant dans les calculs du prix de revient de l'énergie nucléaire. En pareil cas, le rapport des prix de revient de l'énergie nucléaire dans deux pays différents sera peut-être du même ordre que le rapport des charges fixes entre ces deux pays.

On prendra, pour illustrer ce point particulier, l'exemple d'une centrale nucléaire ayant coûté 25 millions de dollars et destinée à produire 100 000 kilowatts d'électricité. Aux États-Unis, si le financement de cette centrale est assuré par l'industrie privée, elle sera grevée d'autant de charges fixes qu'une centrale d'État qui coûterait 66 500 000 dollars et, de ce fait, l'énergie produite reviendra beaucoup plus cher.

Nous ne nous proposons pas d'examiner ici les avantages ou les inconvénients que présente telle ou telle méthode de financement, mais simplement de faire ressortir leurs différences, et de montrer combien il est indispensable de définir les hypothèses sous-jacentes aux tentatives faites pour ramener à un dénominateur commun les estimations établies pour des circonstances différentes.

Dépenses en capital et frais d'exploitation

Les dépenses en capital ne sont pas difficiles à distinguer des frais d'exploitation dans le cas d'une centrale unique. Les frais de construction, comprenant l'achat du terrain, le fonds de roulement et d'autres postes analogues, doivent être imputés au capital. Le coût des matériaux et des services nécessaires à l'exploitation de la centrale, y compris les matières premières qu'elle consomme, est considéré comme une dépense d'exploitation. Pour que l'exploitation soit rentable, les sommes reçues en contrepartie des ventes de produits tirés de l'usine seront affectées au paiement des frais d'exploitation et des charges fixes.

Mais il se pose d'autres questions. La plupart des centrales, par exemple, ne peuvent fonctionner dans de bonnes conditions sans établir un inventaire de leurs matières premières et de leurs pièces de rechange. Ces matières et ces pièces doivent-elles être imputées aux frais d'exploitation ou constituent-elles une fraction des investissements en capital ? La recherche et ses applications doivent-elles être considérées comme frais d'exploitation ou comme une dépense en capital, dont la contrepartie serait fournie par le rendement des nouvelles applications qui seraient couronnées de succès ? La législation fiscale des États-Unis d'Amérique a bien déterminé la façon dont il fallait imputer les dépenses de cette nature, mais elle n'a pas vraiment été jusqu'au cœur de la question.

Les distinctions que l'on a pu établir lorsqu'il s'agissait d'une centrale unique ne peuvent s'appliquer aux divers éléments de l'industrie de la production d'énergie de source nucléaire. On peut considérer la matière première nécessaire à une phase ultérieure des opérations, soit comme une dépense d'exploitation engagée en vue de cette phase, soit comme une combinaison de charges fixes et de frais d'exploitation reportée de la phase précédente. Pour ce qui est de l'industrie dans son ensemble, on peut la considérer en chacun de ses aspects comme une série de charges fixes grevant les investissements en capital, charges auxquelles s'ajoutent les frais d'exploitation afférents à chaque phase. Tel est essentiellement le point de vue que nous adoptons dans le présent document. Nous avons examiné le coût de construction des diverses fractions de l'ensemble et le coût en capital de leur équipement complet.

Il faut se rappeler que ce capital lui-même représente, en somme, le coût de la main-d'œuvre et les matériaux nécessaires à la construction des centrales. Comme ces matériaux, en dernière analyse, sont produits par la main-d'œuvre, les dépenses en capital représentent donc la somme de tous les efforts nécessaires pour construire une centrale. La production d'énergie nucléaire exige une main-d'œuvre hautement qualifiée, qui sera composée dans une proportion inhabituelle d'ingénieurs et de savants possédant des titres et une expérience exceptionnels. Le personnel de ce genre est actuellement très demandé aux États-Unis et c'est pour nous un grave souci que de trouver des méthodes qui nous permettront d'accroître les effectifs de main-d'œuvre technique.

En considérant le coût en capital d'une centrale particulière ou d'une partie de centrale, on se souviendra que de vastes investissements en capital peuvent également être nécessaires pour construire les installations préliminaires au moyen desquelles cette centrale, ou telle partie de son équipement, pourront être mises en place. Si, par exemple, on achète une cuve à pression, dans le coût de cet appareil est comptée la part du coût en capital (charges fixes) représentée par les installations nécessaires à sa fabrication. En revanche, s'il s'agit

de construire un prototype de cuve à pression, les investissements requis par les installations préliminaires seront considérés comme frais d'exploitation et devront être amortis par la construction de nombreuses cuves à pression sur une période donnée. Notons qu'une industrie comme celle dont nous nous occupons ici aura forcément besoin d'un outillage comprenant des modèles nouveaux, destinés à fabriquer des éléments inconnus jusqu'alors; et ce fait peut sensiblement gonfler la somme des investissements initiaux en capital qui seront nécessaires.

Importance des investissements

Les investissements sont moins importants pour certains éléments des centrales nucléaires que pour d'autres. C'est là une des principales raisons de l'optimisme suscité aux États-Unis à l'égard de l'énergie nucléaire produite à des fins économiques. Cet optimisme est d'ailleurs fondé sur des plans de grande envergure élaborés par l'industrie privée et concernant la construction d'importantes centrales électronucléaires.

Il y a un an ou deux, il existait un grand nombre d'estimations et de devis pour des génératrices nucléaires. L'évaluation du coût en capital était de l'ordre de 400 à 500 dollars par kilowatt de puissance installée, même pour de très importantes centrales électronucléaires. Nombreux étaient alors ceux qui trouvaient ces évaluations optimistes — et en fait elles paraissaient bien l'être.

Depuis lors, toutefois, la technologie des génératrices nucléaires a fait d'énormes progrès. On a repris les problèmes posés par la fabrication des piles en les considérant comme des problèmes industriels, et dans le même esprit, on a envisagé les moyens de construire les éléments des piles à des prix abordables. Des évaluations prudentes faites par des sociétés de construction mécanique sérieuses situent maintenant aux environs de 200 à 250 dollars par kilowatt le coût des centrales électronucléaires d'une capacité de 100 000 à 200 000 kilowatts. Il y a là une diminution considérable, et ces nouvelles évaluations semblent fondées sur des bases beaucoup plus solides que les précédentes.

Évidemment, des centrales électronucléaires d'un prix de revient de 200 à 250 dollars par kilowatt de puissance installée offrent peu d'intérêt à priori, lorsqu'on les compare à des centrales chauffées au charbon d'une importance similaire et revenant de 135 à 150 dollars par kilowatt de puissance installée. On se souviendra aussi que les frais d'exploitation des centrales électronucléaires seront probablement plus élevés que ceux d'une centrale chauffée au charbon, en raison des coûts de fabrication et de traitement chimique de l'élément combustible.

Dans ces conditions, pourquoi donc être optimiste? En premier lieu, beaucoup de ceux qui ont fait ces évaluations estiment que le prix de revient des centrales de la première « génération » — si l'on peut dire — de génératrices nucléaires sera peut-être de 20 pour cent plus élevé que celui des centrales qui seront construites par la suite. Les prix de revient de beaucoup de ces premières centrales sont élevés parce qu'elles sont construites en des sites absolument vierges, les frais d'équipement de ces sites étant entièrement imputés à une seule construction industrielle. De même, les centrales électronucléaires requièrent des installations spécialisées qui peuvent être communes à d'autres centrales d'une même série, mais dont le prix de revient est fort élevé lorsqu'il doit être imputé à la construction d'une seule centrale. On estime que la construction en série de piles abaisserait de 10 à 20 pour cent le coût des installations spéciales. Si ces considérations sont valables, il semblerait que la deuxième « génération » de génératrices nucléaires — et en tout cas la troisième — ne serait pas d'un prix de revient plus élevé par kilowatt de puissance installée que les installations chauffées aux combustibles classiques; il se pourrait même que ce prix soit moins élevé.

La raison en est assez simple : les prix de revient apparents des grandes centrales électronucléaires ont été abaissés jusqu'à n'être plus que de 50 pour cent supérieurs au prix de revient des centrales de type classique, mais le prix de revient d'un grand nombre d'éléments de la centrale, lui, n'a pas diminué, et il est encore de nature à faire hésiter. Si nous ne pouvons produire d'énergie nucléaire dans des conditions rentables, c'est donc parce que nous ne sommes en mesure de prouver, dans la plupart des cas, ni qu'il est possible de fabriquer des éléments combustibles à assez bas prix, ni qu'il existe des méthodes peu coûteuses pour assurer le traitement chimique des éléments combustibles irradiés. Cependant, les prix de revient pourraient se trouver soudain considérablement abaissés, même pour une centrale unique, si l'on découvrait tout simplement le moyen d'augmenter la quantité de combustibles traités par chaque centrale. Une telle économie peut être envisagée beaucoup plus facilement que la diminution du prix de revient de la centrale proprement dite, diminution qui, elle, ne semble pas facile à réaliser. On peut donc espérer une amélioration rapide des conditions d'exploitation en ce qui concerne les éléments combustibles et leur traitement chimique.

Ainsi, ceux qui prennent un risque en construisant des centrales électronucléaires se sentent justifiés à le faire, à l'heure actuelle, parce que les coûts en capital de ces centrales sont maintenant assez près de pouvoir soutenir la concurrence, et cela malgré les prix de revient actuellement élevés des services auxiliaires. Ils sont convaincus que ces prix de revient baisseront à très bref délai, grâce à des recherches et à des travaux d'application activement poussés. Il faudrait aussi noter que la construction de la plupart des centrales électronucléaires elles-mêmes a été échelonnée sur d'assez longues périodes, de quatre à cinq ans, de manière que la Commission de l'énergie atomique et l'industrie privée puissent poursuivre les travaux de recherche

et d'application, seuls capables de fournir les fondements techniques de la construction et de l'exploitation réelles des centrales nucléaires.

ORDRE DE GRANDEUR DES INVESTISSEMENTS

Nous exprimerons toutes nos évaluations des investissements en capital se rapportant aux divers éléments d'un ensemble de production d'énergie de source nucléaire, par rapport à 1 kilowatt de puissance installée dans une centrale électronucléaire. Ainsi, les évaluations seront toutes établies sur une base commune.

Nous supposerons que la pile type est un convertisseur thermique hétérogène dont l'élément combustible est de l'uranium plus ou moins enrichi, et qui produit de l'énergie avec un rendement global d'environ 30 pour cent. Le taux d'utilisation est de 70 ou 80 pour cent. Nous supposerons également qu'il est possible d'assurer une assez longue durée de vie aux cartouches combustibles — hypothèse optimiste sans doute, mais parfaitement justifiable en l'état actuel de la technique.

Bien que les prix de revient réels soient naturellement très différents selon le type de centrale électronucléaire considéré, la base de calcul que nous avons retenue réduit le nombre des variables. Il semble bien que les différences ne dépassent pas la limite après laquelle des chiffres exprimant les prix de revient cessent d'être exacts, cette limite étant du reste fort reculée.

D'une façon très générale, les dépenses d'investissement que nous suggérons traduisent bien l'importance prise par l'industrie nucléaire aux États-Unis. Même si certaines des réalisations offrent une importance limitée, elles se situent dans le cadre général de ce qui est, d'ores et déjà, une très grande industrie. Là où certains prix de revient demeurent élevés, ils se rapportent généralement à des opérations, qui, à l'heure actuelle, ne font pas réellement partie intégrante de l'industrie de l'énergie atomique. Au demeurant, la technologie ainsi que l'ampleur même de ces opérations, ramèneront certainement ces prix de revient à un niveau comparable à celui de l'industrie dans son ensemble.

Extraction et concentration des minerais

Les investissements en capital consacrés à la recherche géologique, à l'extraction et à la concentration des minerais varient très largement suivant le degré de concentration des minerais et la situation locale. Dans la plupart des cas, une grande partie des frais est absorbée par la main-d'œuvre plutôt que par des biens d'équipement. D'une façon générale, il semble que le coût en biens d'équipement de ces diverses activités pourrait être de l'ordre de 1 dollar par kilowatt de puissance installée — y comprix l'extraction et le broyage du minerai.

Il convient de souligner que les besoins annuels en oxyde d'uranium par kilowatt de puissance installée sont faibles et restent toujours inférieurs à 1 livre (0,45 kg) par kilowatt pour un convertisseur thermique type.

Quant à la purification du concentré d'uranium et sa réduction sous forme de métal utilisable comme combustible, ces opérations peuvent représenter de 1 à 3 dollars par kilowatt de puissance installée.

Les frais d'investissement, pour tout processus d'alimentation, s'élèvent donc au total à une somme de 2 à 4 dollars par kilowatt de puissance installée, pour un convertisseur thermique type utilisant son combustible avec un rendement satisfaisant. Ces chiffres seraient un peu plus élevés pour une installation de faible importance; la différence n'est toutefois pas trop sensible, et d'ailleurs, il n'est pas possible d'évaluer avec précision la variation du prix de revient selon les dimensions de l'installation.

Enrichissement des minerais

Du point de vue de l'enrichissement des minerais, on peut diviser les piles en quatre groupes :

1. Les piles utilisant des minerais non enrichis, telles que les grandes piles à eau et à graphite ou les piles utilisant l'eau lourde comme élément ralentisseur;

2. Les piles utilisant de l'uranium faiblement enrichi, telles que la plupart des génératrices nucléaires de conception américaine;

3. Les piles compactes utilisant de l'uranium fortement enrichi;

4. Les piles utilisant de l'uranium naturel, ou du thorium, complété par du plutonium recyclé ou de l'uranium-233 fournissant l'enrichissement nécessaire. A la longue, un grand nombre des génératrices nucléaires des États-Unis d'Amérique seront transformées de façon à fonctionner de cette manière.

Nous nous intéressons ici aux piles du deuxième groupe — celles qui utilisent un combustible faiblement enrichi. Elles requièrent la mise sur pied d'une usine de diffusion. Celle-ci doit fournir d'une part les quantités d'uranium enrichi initiales pour la mise en marche de la centrale, et d'autre part les quantités exigées par son fonctionnement continu.

Les investissements nécessaires à la construction d'usines de diffusion varieront en importance avec chaque type de pile et chaque méthode d'exploitation; il n'est pas possible d'étudier ces facteurs d'une façon détaillée dans le présent rapport. Essayons cependant d'évaluer le total des investissements qu'exige une usine de diffusion, en incluant dans ce devis les générateurs d'électricité nécessaires à la fabrication du combustible pour une pile à uranium faiblement enrichi; on constate que ces investissements s'élèvent à environ 40 à 80 dollars par kilowatt de puissance installée. Certaines

génératrices nucléaires qui utilisent leur combustible avec un mauvais rendement exigeront peut-être des investissements plus élevés, alors que d'autres, qui obtiennent un rendement particulièrement favorable (la pile homogène à eau, par exemple), pourront être construites à meilleur compte.

On remarquera que les centrales à diffusion gazeuse des États-Unis d'Amérique ont été construites sur une grande échelle, de sorte que leur capacité d'utilisation de combustible ne peut être réduite sans inconvénient; une utilisation réduite de cette capacité ou l'emploi d'un mode de séparation différent et mieux adapté à des centrales plus petites, augmenterait sensiblement le montant des investissements par kilowatt de puissance installée.

Fabrication d'éléments combustibles

On trouve, dans la fabrication de cartouches combustibles, un autre poste de dépenses dont l'importance est fonction du type de pile. Il y a un ou deux ans, le prix de revient de cette fabrication préoccupait vivement les spécialistes, mais aujourd'hui les travaux de caractère industriel qui se sont poursuivis dans ce domaine ont dissipé la plupart des craintes, même si les coûts de fabrication de certains types de cœurs de piles demeurent élevés. L'industrie américaine s'est particulièrement distinguée dans ce genre de fabrication. Étant donné que les cartouches sont de types très variés et que chaque pile particulière ne peut utiliser que certaines espèces, on a recouru pour cette phase de la fabrication à des types d'équipement et à des méthodes industrielles très souples. Les industriels ont fait preuve de beaucoup d'ingéniosité, et nous citerons un cas où l'un d'eux a pu fabriquer un type particulier de cartouche combustible par un procédé nouveau pour un prix de revient égal au quinzième environ du prix auquel aboutit notre procédé actuel.

Bien qu'il soit extrêmement difficile de prévoir le montant des investissements nécessaires à la fabrication de cartouches combustibles et à l'installation de laboratoires d'essais, il serait raisonnable de prévoir 5 dollars au moins par kilowatt de puissance installée pour une usine assez importante desservant un certain nombre de génératrices nucléaires de bonne taille.

Cette estimation n'est cependant pas complète, et elle est moins rassurante qu'il n'y paraît, puisque les cartouches combustibles doivent être, après utilisation, soumises à une nouvelle fabrication qui nécessite du plutonium recyclé ou de l'uranium-233 recyclé. Ces matières émettent des rayonnements alpha et présentent des risques graves. Il peut également être souhaitable, pour des raisons d'ordre économique, de ne pas éliminer complètement les produits de fission et de fabriquer des cartouches combustibles à partir de substances émettant des rayons gamma aussi bien que des rayons alpha. Les matières fissiles peuvent être transformées en cartouches combustibles séparées ou mélangées à nouveau à de l'uranium ou à du thorium, selon l'intérêt économique que présente l'un ou l'autre de ces procédés dans le cadre général de la fabrication.

Quoi qu'il en soit, nous estimons actuellement que l'installation d'une usine de fabrication de cartouches combustibles capable de procéder au recyclage de plutonium ou d'uranium-233 coûtera peut-être trois fois plus que l'installation d'une usine traitant des matières non actives, soit 15 dollars par kilowatt de puissance installée. Dans l'état actuel de nos connaissances, ce chiffre doit être considéré comme une approximation très incertaine.

Un avantage certain des piles homogènes est qu'elles permettent de réduire ou d'éliminer cette dépense. L'avantage qu'offrent les piles qui utilisent des cartouches combustibles d'une fabrication peu coûteuse n'est pas moins évident.

Quant à la dimension des usines, elle influe également sur le coût en capital, mais de manière variable selon le type d'installation dont il s'agit. Il ne semble pas, du reste, que les différences soient très considérables. En ce qui concerne les usines dont nous parlons ici, on dira en substance que la dépense en capital est proportionnelle à la capacité de l'usine, affectée de l'exposant 0,4 à 0,5.

Production de matières spéciales

Il n'est pas possible de considérer ici le montant des investissements nécessaires à la production de tous les genres de matières spéciales généralement exigées par la production d'électricité de source nucléaire. Nous bornerons notre exposé à deux matières qui présentent un intérêt particulier : le zirconium exempt de hafnium, et l'eau lourde.

Le coût d'une usine d'eau lourde déjà importante est évalué à 200 dollars par an et par livre (0,45 kg) d'eau lourde produite, y compris les usines accessoires. Les besoins étant de 1 à 2 livres (0,45 à 0,9 kg) d'eau lourde par kilowatt pour les piles qui utilisent l'eau lourde comme élément ralentisseur, la quantité annuelle nécessaire à la dotation initiale et aux compléments nécessaires s'élève à 0,15 (0,07 kg) à 0,25 livre (0,11 kg) par kilowatt, soit un investissement au capital de 30 à 50 dollars par kilowatt produit dans la centrale. Ces chiffres pourraient sans doute être un peu réduits si l'on utilise l'eau lourde de façon très économique et si les pertes en cours d'exploitation demeurent très faibles.

La demande exerce peu d'effet sur le montant des investissements, mais l'usine doit produire 25 à 50 tonnes d'eau lourde par an pour que les chiffres cités au paragraphe précédent restent valables.

Une usine produisant du zirconium à l'échelle industrielle coûtera environ 12 dollars par an et par livre (0,45 kg) de zirconium exempt de hafnium, somme dont 40 pour cent environ représentent le coût des installations servant à éliminer le hafnium du zirconium. Étant donné qu'une grande généra-

trice nucléaire qui utilise du zirconium dans des conditions économiques n'absorberait sans doute que de 0,1 à 0,2 livre (0,04 à 0,09 kg) de zirconium par an et par kilowatt de puissance installée, l'investissement en capital serait de l'ordre de 1 à 2 dollars par kilowatt.

Centrales électronucléaires

Malgré les nombreuses études consacrées aux États-Unis — par des groupes de chercheurs ou par des individus — au prix de revient des centrales électronucléaires, il n'est pas encore possible de parler avec la moindre certitude du coût en capital d'une centrale de ce genre. La raison en est surtout que nous n'avons jusqu'ici installé complètement aucune centrale électronucléaire importante, et que nous ignorons par conséquent à combien reviennent au total les études préliminaires et la construction proprement dite.

Parmi les évaluations qui ont été publiées, beaucoup sont l'œuvre de personnes insuffisamment au courant des études, de la construction et des méthodes permettant d'établir avec sûreté les prix de revient. Les évaluations de ce genre sont généralement trop faibles.

Nous disposons cependant d'évaluations incontestablement plus sérieuses. Il s'agit d'un projet de construction de centrale électronucléaire industrielle, dépendant du programme de mise au point des piles de démonstration; et d'un projet présenté par la Consolidated Edison Company de New York, qui a demandé à la Commission de l'énergie atomique l'autorisation de construire une centrale électronucléaire. Des cinq évaluations ainsi présentées, trois sont de l'ordre de 235 à 250 dollars par kilowatt d'énergie nette; il s'agit de deux projets de piles à eau sous pression et d'un projet de pile à eau bouillante; la puissance de ces piles variera de 100 000 à 180 000 kilowatts.

Une autre évaluation faite selon des données analogues et portant sur une pile de type homogène à eau aboutit à des prix très semblables. Une société américaine a fait connaître son intention de construire une pile de type homogène à eau pour le prix de 210 dollars par kilowatt, la puissance installée prévue étant de 100 000 kilowatts ou davantage.

Il convient de souligner que ces centrales, qui présentent surtout un caractère expérimental, ne seront pas construites avant plusieurs années. Elles seront les premières de leur type, et de nombreux éléments d'équipement devront être fabriqués spécialement. De plus, chacune d'elles doit être située en un emplacement nouveau où le prix du terrain est élevé et où les frais d'aménagement du terrain et de raccordement aux services publics ne le seront pas moins, puisqu'ils seront supportés par une seule usine.

Une deuxième centrale du même type venant doubler chacune de ces centrales et érigée à proximité immédiate de la première pourrait être construite pour un prix de revient inférieur de 10 à 20 pour cent. A mesure que l'on simplifiera la conception d'ensemble, que l'on découvrira des matières moins coûteuses et que l'on comprendra mieux quel profit on peut retirer de la construction multiple et de méthodes de fabrication en très grande série, on pourra probablement réduire de 15 à 20 pour cent les prix de revient des mêmes types fondamentaux de génératrices nucléaires. Il n'existe pas d'autre moyen d'y parvenir que de construire d'abord un nombre raisonnable de centrales électronucléaires appartenant à la « première génération ».

N'oublions pas que les savants et les ingénieurs qui ont étudié ce problème sont tous arrivés à une conclusion : rien n'empêche de construire des centrales électronucléaires d'assez grande importance à un prix aussi avantageux, sinon plus, que celui des centrales de type classique. Un long chemin nous sépare encore de ce but; peut-être nous faudra-t-il cinq ou dix ans pour le parcourir, mais nous nous en approchons à un rythme satisfaisant.

En revanche, la construction d'une centrale électronucléaire de petite dimension se heurte à d'énormes difficultés, qui ne seront peut-être pas surmontées de si tôt. Les installations qui ont une puissance installée de 10 000 à 20 000 kilowatts posent un problème ardu, dont la solution est encore éloignée, sauf peut-être dans les régions où le combustible est particulièrement cher; et même là, il n'est pas prêt d'être résolu.

On s'est efforcé à plusieurs reprises de mesurer l'incidence de la dimension des centrales électronucléaires sur leur prix de revient. Les données dont nous disposons sont insuffisantes pour établir des corrélations de cette nature. D'après les données existantes, on peut obtenir une évaluation approximative du prix de revient en affectant de l'exposant 0,7 le chiffre de la puissance installée d'un type particulier de pile. S'il devenait possible de mettre au point de nouveaux types de piles convenant particulièrement à de petites centrales électronucléaires, il serait plus juste d'utiliser l'exposant 0,9.

Le coût du groupe turbo-générateur est environ le même pour une centrale électronucléaire que pour une centrale de type classique de la même puissance, bien que la production de vapeur se fasse dans des conditions assez différentes. Dans la mesure où cette production a lieu dans de moins bonnes conditions, le coût de cet élément de la centrale augmente, mais il augmente assez peu, et ce n'est pas pour cette raison qu'une centrale électronucléaire revient à un prix plus élevé; c'est parce que la chaudière y est remplacée par une pile. La différence due à une vapeur de mauvaise qualité ne dépasse probablement pas 30 dollars par kilowatt, même dans les cas extrêmes. Dans une grande centrale moderne, le groupe turbo-générateur coûtera environ 80 dollars par kilowatt de puissance installée.

Il faut également tenir compte de la valeur du stock de combustible nucléaire. Sous ce poste, on comprendra non seulement la totalité de la matière qui se trouve dans la pile, mais aussi celle qui est en cours de transformation en cartouches combustibles, celle qui est emmagasinée pour refroidir après avoir été irradiée, et celle qui subit un traitement chimique. La quantité et la valeur de la matière varient selon le type de pile. Ici, l'investissement total peut atteindre 50 dollars par kilowatt pour certaines piles et une somme plus élevée pour d'autres. Pour les piles de type hétérogène, il sera de l'ordre de 20 à 40 dollars par kilowatt. Pour d'autres types, notamment pour la pile homogène aqueuse, il sera peut-être sensiblement moindre. Si les quantités de combustible enrichi sont moindres ou nulles, l'utilisation d'eau lourde viendra réduire sensiblement le poste « stock de combustible », mais augmentera le poste correspondant de l'inventaire. Or, en ce cas, il faut calculer pour l'eau lourde le prix de revient total, y compris les frais d'exploitation.

Nous avons examiné plus haut le montant des investissements nécessaires pour les installations produisant du combustible et de l'eau lourde et nous ne les reporterons pas dans cette partie de notre devis. Il importe toutefois de noter que les charges fixes sont moins élevées sur le stock que sur l'usine, du moins si le stock ne se déprécie pas.

Le terrain sur lequel est construite une centrale électronucléaire constitue un élément des frais d'investissement qui peut devenir important. Le prix d'achat des terrains, même pour des centrales de type classique, est parfois élevé parce que l'on cherche à édifier l'installation près de la source d'énergie productrice de courant et près d'une source d'eau de refroidissement. Ces deux conditions préalables ne sont pas moins importantes lorsqu'il s'agit d'une centrale électronucléaire. Les centrales de type classique doivent généralement être construites à proximité d'un point d'eau et d'un moyen de transport à grand débit qui permette d'amener les tonnages requis de charbon ou de produits pétroliers qui serviront de combustible. C'est ainsi qu'une centrale de l'importance de Clifty Creek, actuellement en construction à Madison, Indiana, et dont la puissance installée sera de 1 200 mégawatts consommera environ 12 000 tonnes de charbon par jour.

Bien que les centrales électronucléaires n'aient pas exactement les mêmes exigences, il convient de remarquer que leur construction absorbera de grandes quantités de matériel (citons comme exemple la cuve à pression, dont le poids et les dimensions sont considérables) et qu'il sera nécessaire d'évacuer des déchets dans des récipients lourds. Ce sera donc également une quasi-nécessité, pour les centrales électronucléaires, d'avoir un accès commode à une voie de communication propre aux gros transports.

Il faut tenir compte, enfin, des dangers particuliers que présentent les piles, à côté desquels le danger des fumées et des vapeurs émises par une centrale de type classique est tout à fait négligeable. Dans des conditions normales, cependant, la centrale électronucléaire n'offrira pas ce genre d'inconvénients, pas plus qu'elle ne dégagera de matières radioactives. N'étaient les possibilités, d'ailleurs lointaines, d'accidents survenant à la pile, ou de fuites de substances dangereuses, les centrales électronucléaires seraient l'ensemble industriel idéal convenant à n'importe quel emplacement.

La Commission consultative des mesures de sécurité de la Commission de l'énergie atomique a mis au point une formule qu'elle utilise de manière approximative pour déterminer la superficie à clôturer dans le cas d'une centrale électronucléaire. Selon cette formule, il faut environ un arpent par kilowatt, soit une superficie plusieurs milliers de fois plus étendue que celle qu'exigent les centrales de type classique. Pour ces dernières, le terrain est estimé à environ 1 dollar le kilowatt, ce prix pouvant varier de 0,10 dollar à 4 ou 5 dollars. Pour les centrales atomiques, on devra donc utiliser un terrain de très peu de valeur, ou alors chercher une autre solution. On ne trouve pas de terrain à très bon marché près des centres de consommation de courant, et si l'on construit dans des régions où le travail est à bas prix, on devra probablement faire face à des frais supplémentaires de transport et peut-être aussi à des pertes.

Le remède à ces difficultés peut être fourni par des cuves ou des revêtements qui recouvriraient entièrement la pile et tous les circuits radioactifs et qui seraient à l'épreuve de tout « incident » concevable. Ce matériel de protection coûterait peut-être 10 à 20 dollars par kilowatt, mais cette dépense est bien inférieure à celle qu'impliquerait l'achat d'un terrain bien placé ou des transports à grande distance, voire l'addition de ces deux dépenses. Dans les paragraphes précédents, nous avons du reste tenu compte, lors de nos évaluations de prix de revient, d'un tel dispositif de protection.

Même si elles sont ainsi protégées, il est probable que les centrales électronucléaires occuperont plus d'espace que les centrales de type classique et qu'elles se trouveront encore situées assez loin des grands centres de population.

Traitement du combustible irradié

Si l'on met à part le coût de la centrale électronucléaire proprement dite, le prix de revient des installations de traitement des combustibles irradiés est l'un des postes les plus importants du budget de construction de l'ensemble, et l'un de ceux qu'il est le plus difficile de calculer d'avance. Il est intéressant de remarquer qu'on se préoccupe assez peu du problème du traitement chimique des cartouches combustibles, et que, de ce fait précisément, on ne peut guère envisager de moyen d'en abaisser le prix de revient.

Si l'on estime le coût d'un traitement chimique, il faut tenir compte de toutes les opérations suivantes :

on doit éliminer toute incrustation, dissoudre la matière combustible en vue de son traitement ou la soumettre à un autre mode de préparation, séparer les matières irradiées, décontaminer, purifier et réduire aussi bien la matière combustible elle-même que toute matière fissile qui aurait été produite, concentrer et évacuer les produits de fission ainsi que tous les autres déchets présents parmi les combustibles.

Sur la base de cette liste d'opérations, on devrait pouvoir analyser les prix de revient, en tenant compte du degré d'enrichissement du combustible, de la nature des matériaux de revêtement et d'alliage, de la capacité totale de la centrale, et d'autres facteurs. Mais les formules que nous pourrions établir à ce sujet sont aléatoires et à peu près inutiles; seule l'expérience pratique montrera ce que coûteront réellement les génératrices nucléaires. Compte tenu de tous les facteurs en cause, l'immense variété des matières combustibles ne permet que difficilement d'établir une évaluation du prix de revient; cette variété est également cause de grandes difficultés en ce qui concerne le traitement chimique des cartouches combustibles, que ce traitement ait lieu dans une des centrales existantes ou dans toute autre qui ne serait pas construite précisément pour la cartouche combustible en question.

Pour une centrale électronucléaire de 100 000 kilowatts d'un rendement thermique de 30 pour cent et d'un taux d'utilisation de 80 pour cent, l'usine de traitement doit pouvoir traiter chaque jour 0,28 kg de produit de fission et récupérer de 0,2 à 0,3 kg de nouvelles matières fissiles, selon le taux effectif de conversion.

La quantité totale de matières mises en service sera fonction de la conversion de la matière combustible et du degré auquel l'uranium (ou le thorium) est incrusté ou dilué dans d'autres matières. Si l'uranium utilisé comme combustible est irradié au taux de 5 000 mégawatts par jour et par tonne métrique, chiffre qui n'a pas encore été atteint mais que l'on peut tenir pour raisonnable, la quantité d'uranium mise en service chaque jour ne sera que de 53 kg pour une centrale de 100 000 kilowatts. Si l'on parvient jusqu'à 10 000 mégawatts-jour par tonne métrique, ce chiffre tombera à 27 kg.

Il paraît évident que ce sont là des chiffres d'alimentation très faibles pour des usines de traitement chimique — même pour de petites usines pilotes. Le coût élevé du blindage et du matériel de télécommande ne justifie pas la construction d'une usine suffisant tout juste à compléter une pile de 100 mégawatts. Et il faut noter qu'en élevant le taux de consommation de la centrale, on réduit encore, proportionnellement, le taux de production de l'usine de traitement chimique.

En outre, comme nous l'avons vu plus haut, il existe des cartouches combustibles très diverses pour chacune des génératrices nucléaires considérées, et l'on ne peut envisager, pour l'instant, de les diriger tous vers une seule usine pour y subir le traitement chimique approprié; en effet, le degré de connaissance actuel ne permet pas encore de construire une usine d'un prix de revient assez bas et d'une exploitation assez souple pour recevoir des matières si différentes par la forme, la dimension, le degré d'enrichissement, le degré de combustion ainsi que les matières incrustées et les alliages qui lui sont présentés. C'est peut-être dans ce problème que réside la difficulté ultime que rencontrent encore aujourd'hui les applications de la science nucléaire aux États-Unis.

On remarquera d'autre part que le transport de cartouches combustibles fortement radioactives jusqu'à une seule usine de traitement entraînerait des frais de transport assez considérables pour certaines centrales aux États-Unis. Ces frais seraient cependant moins élevés que ceux auxquels on s'exposerait en construisant un grand nombre de petites usines, à condition que l'importance de l'usine unique soit en elle-même une source d'économie.

Il est donc impossible d'envisager le prix de revient d'usines de traitement jumelées à une pile d'importance moyenne, étant donné l'importance excessive des investissements que cela entraînerait. En revanche, nous allons examiner l'usine de traitement qui paraît avoir la taille minimum pour être rentable — dans les conditions actuelles — soit une usine capable de traiter le combustible provenant d'une demi-douzaine de génératrices nucléaires d'importance moyenne. Nous supposerons que les cartouches combustibles provenant de chacune d'elles sont tous semblables, ce qui est évidemment une hypothèse fantaisiste.

En supposant ces conditions réunies, nous arriverions, pour plusieurs types et combinaisons de traitements chimiques différents appliqués à des cartouches combustibles hétérogènes, aux environs de 30 dollars par kilowatt de puissance installée dans les centrales.

Le blindage, la ventilation spéciale, la télécommande, l'équipement de sécurité, etc., tous éléments qui ne sont pas en rapport direct avec les dimensions des installations, entrent pour une part élevée de ce prix de revient. Par conséquent, la capacité de production proprement dite de l'usine de traitement chimique influera assez peu sur son coût en capital. *Grosso modo*, on peut dire qu'en affectant de l'exposant 0,5 la quantité de matières traitées, on obtient un chiffre qui peut servir à établir la proportion juste entre la capacité et le prix de revient.

C'est ainsi que le prix de 30 dollars par kilowatt pourrait être réduit de moitié pour une usine de capacité quadruple, mais ce ne pourrait être envisagé que dans l'hypothèse d'un nombre considérable de piles du même type. En revanche, si l'usine ne peut assurer le service que d'une ou de deux piles de 100 000 kilowatts, les investissements s'élèveront à 60 dollars par kilowatt ou davantage.

Il ne semble pas que les frais du traitement chimique appliqué au cycle du thorium soient sensiblement différents de ceux du traitement appliqué au cycle de l'uranium; on s'attend néanmoins à des chiffres un peu plus élevés.

Dans la pratique, on ne considère pas qu'il soit intéressant de concevoir et de construire un certain nombre de génératrices nucléaires qui utiliseraient les mêmes cartouches combustibles, en vue de diminuer les frais de traitement chimique. On espère plutôt que des usines centrales de transformation seront créées ultérieurement, dont le fonctionnement très souple permettra de traiter les cartouches combustibles les plus diverses. Il sera peut-être possible de réaliser par la suite des usines d'un prix de revient plus faible qui pourront desservir deux ou trois piles, par exemple.

On pourrait également envisager d'utiliser une pile homogène aqueuse ou à métal liquide, où le combustible peut être traité plus facilement et où les coûts peuvent être réduits en conséquence. On peut évaluer le prix de piles de ce type à 30 dollars par kilowatt pour une grande pile (200 000 kilowatts), peut-être même à moins. Mais de toute manière, ce procédé ne résoudrait pas complètement le problème.

On pourrait envisager de se débarrasser purement et simplement des cartouches combustibles sans les soumettre à aucun traitement chimique : il faudrait pour cela que l'utilisation de minerais faiblement enrichis permette cependant d'obtenir un taux de conversion en énergie électrique suffisamment élevé. Un tel résultat nécessiterait l'emploi d'eau lourde, mais ce procédé serait évidemment bien plus économique, du moins tant que des méthodes de traitement chimique moins onéreuses ne seront pas mises au point. Quoi qu'il en soit, il paraît peu probable qu'on puisse produire du courant électrique dans des conditions rentables si le prix du traitement chimique nous oblige à éliminer sans récupération les cartouches combustibles, même si celles-ci consistent en uranium faiblement enrichi.

Il faut aussi penser que l'opération finale de traitement du combustible peut être fort complexe. On pourrait donc concevoir que l'opération préliminaire se fasse à chaque centrale électronucléaire, tandis que les opérations générales de séparation auraient lieu dans des usines collectives. Les opérations terminales de purification et de réduction se feraient dans d'autres usines encore.

L'élimination des déchets à la fin du traitement est généralement considérée comme une dépense d'exploitation plutôt que comme une dépense d'investissement, même si l'on doit immobiliser des sommes importantes pour construire des cuves d'emmagasinage. Ces immobilisations augmentent d'importance à mesure que l'usine développe son activité. Il y a lieu de noter cependant que ces immobilisations sont de l'ordre de 0,1 millième de dollar par kilowattheure, ou moins encore. Dans des circonstances défavorables, l'emmagasinage et l'élimination des déchets pourront représenter une dépense triple de ce chiffre.

Investissements accessoires

En vue d'exécuter des travaux d'application relatifs aux piles et autres éléments des complexes industriels nucléaires, les États-Unis d'Amérique ont jugé nécessaire de construire de très vastes laboratoires. Sans compter les laboratoires spéciaux et les laboratoires des services techniques des usines en exploitation, leurs investissements à ce titre atteignent maintenant une somme de l'ordre de 300 millions de dollars, dont les deux tiers sont consacrés à des travaux d'application sur les piles. La moitié peut-être de ces derniers sont orientés vers la mise au point de génératrices nucléaires. Et si nous n'avions pas d'autres programmes de travaux en cours, c'est même probablement une somme bien plus élevée que 100 millions de dollars que nous aurions investie dans les laboratoires de recherche et d'application sur les piles de ce genre.

S'il est douteux que le gouvernement crée encore beaucoup de laboratoires ou d'installations destinés à la mise au point des piles, nous pensons que les prochaines années verront l'industrie privée y consacrer d'importants investissements. Ni le coût de construction de ces laboratoires ni les frais d'exécution des travaux auxquels ils sont destinés ne peuvent être, à proprement parler, imputés au prix de revient de l'énergie de source nucléaire qui pourrait un jour être produite. Ces frais sont cependant très élevés, et ils devraient être considérés comme des investissements en capital indispensables si l'on veut produire de l'électricité de source nucléaire dans des conditions économiques. Aussi admet-on généralement que ces dépenses sont justifiées et qu'elles seront tôt ou tard compensées par l'économie réalisée en fin de compte le coût de l'énergie électrique.

Lorsque les États-Unis, en 1954, ont publié leur programme de cinq ans pour la mise au point des génératrices nucléaires, on estimait à environ 250 millions de dollars le montant des dépenses que ce plan impliquait, y compris les travaux auxiliaires, pour la mise au point de cinq types de piles. A la fin de ce programme, quatre de ces piles auront dépassé la phase des expériences (faites dans des usines pilotes) et la cinquième, la pile à eau sous pression, aura dépassé la phase du prototype.

Il faut donc investir à peu près 40 millions de dollars pour amener un type de pile jusqu'à la conclusion de la phase expérimentale, en passant par la recherche et les travaux d'application. Il se peut que les dépenses soient beaucoup plus élevées pour certains types, et moins élevées pour d'autres, mais il s'agit en tout cas d'un ordre de grandeur vérifié par l'expérience.

Si les travaux ne portaient que sur un seul type de pile au lieu d'être menés parallèlement sur plu-

sieurs types, ils entraîneraient des investissements beaucoup plus élevés. En effet, en exécutant plusieurs programmes parallèles suivant un plan coordonné, on peut, dans de nombreux cas, utiliser le résultat de certaines recherches pour faire progresser la technique commune.

Il est naturellement indispensable de construire et d'exploiter un prototype de génératrice nucléaire de grande puissance. Ces appareils sont coûteux : leur prix de revient s'échelonne entre 20 et 50 millions de dollars. Mais puisqu'ils produiront de l'énergie utile, leur coût total ne doit pas nécessairement être imputé sur le budget de la recherche et de l'application. Dans les conditions actuelles, la moitié ou le tiers seulement du coût d'une centrale prototype devrait être considéré comme relevant du budget d'investissements au titre de la recherche et de l'application.

Sans donner aux chiffres une signification trop absolue, on peut cependant estimer comme suit le montant probable des investissements qu'exigent l'étude et la réalisation d'un type de génératrice nucléaire :

	Dollars
Laboratoires et installations . .	20 000 000
Travaux de recherche et d'application	40 000 000
Part du prix de revient du prototype qui incombe au budget d'investissements	10 000 000
TOTAL	70 000 000

Résumé

Il peut être intéressant, en conclusion, d'examiner dans leur ensemble les dépenses d'investissement, en nous rappelant qu'elles ne s'additionnent pas exactement puisque les mêmes matières ne seront pas utilisées dans tous les sytèmes et qu'il y aura, de ce fait, un certain nombre de dépenses comptées deux fois.

	Dépenses d'investissement par kilowatt de puissance installée, en dollars
Recherche géologique, extraction, concentration des minerais	1
Purification et réduction .	1 à 3
Enrichissement	40 à 80
Fabrication de cartouches combustibles inertes . .	5
Fabrication de cartouches combustibles radioactives	15
Fabrication d'eau lourde . .	30 à 50
Fabrication de zirconium .	1 à 2
Centrale électronucléaire .	210 à 250
Stock de combustible . . .	20 à 40
Blindage	10 à 20
Traitement du combustible	30 à 60

On pourrait raisonnablement conclure que les dépenses totales d'investissement pour l'ensemble d'une grande génératrice nucléaire avec toutes ses installations annexes s'élèveraient à 350 dollars par kilowatt de puissance installée.

Il est vraisemblable que les centrales électronucléaires de la deuxième « génération » seront construites à moindres frais. Un chiffre de 250 dollars par kilowatt serait probablement plus proche du niveau où ces centrales pourraient soutenir la concurrence des centrales du type classique. Il semble que ce chiffre ne soit pas chimérique pour des piles qui seront en construction d'ici cinq à dix ans.

INVESTISSEMENTS EXIGÉS PAR LES CENTRALES DE TYPE CLASSIQUE

Lorsqu'on étudie les investissements en capital qu'exige une centrale électronucléaire, il est utile de les comparer aux investissements, même approximatifs, nécessaires à la construction d'une centrale de type classique. Bien qu'il soit impossible d'établir des comparaisons rigoureuses en raison de différences entre les coûts d'exploitation et entre les charges fixes, les chiffres pourront avoir une valeur d'indication appréciable.

Dans les centrales de type classique, les prix de revient s'abaissent continuellement à la suite des améliorations techniques. Certains progrès réalisés en matière nucléaire contribueront même, à n'en pas douter, à réduire les prix de revient des centrales chauffées au charbon. Lorsqu'on examine l'avenir de la concurrence entre l'électricité de source nucléaire et l'électricité de source classique, on doit faire la part de ces améliorations. A l'avenir, les centrales électronucléaires se trouveront en concurrence avec des centrales utilisant des combustibles classiques, dont le rendement sera au moins aussi favorable que celui des meilleures centrales actuellement en construction.

Centrales chauffées au charbon

Actuellement, les prix de revient des centrales américaines chauffées au charbon accusent des variations sensibles, qui sont dues en partie aux différences entre les dimensions des centrales, et en partie aux différences entre les rendements maxima, celles-ci étant à leur tour fonction du prix du charbon. En plus de ces éléments interviennent également les différences entre les coûts de construction, qui tiennent à l'emplacement, à la saison et au programme de construction suivi. Enfin, les modalités d'exploitation entrent également en ligne de compte.

En dépit de tout cela, il semble que le coût de construction s'établisse actuellement, pour de grandes centrales d'une capacité de 400 000 à 600 000 kilowatts composées de 2 à 4 générateurs, à 130 ou 135 dollars par kilowatt de puissance installée, y compris l'achat du terrain et l'établissement de voies d'accès. Certaines centrales ont été construites pour un prix un peu moins élevé, mais ces

chiffres semblent représenter une évaluation assez juste des possibilités actuelles.

Les centrales à charbon ont habituellement une réserve de combustible d'une tonne par kilowatt de puissance installée; le fait de maintenir ce stock, qui équivaut à environ quatre mois de consommation, augmente de 6 à 8 dollars le montant des investissements. Dans certaines régions où les possibilités de transports dépendent très directement des saisons, la réserve peut être plus importante.

Bien que l'extraction de charbon n'atteigne pas actuellement la capacité maximum des installations minières, on devra développer l'industrie charbonnière d'ici quelques années; en effet, la demande de courant, d'acier et d'autres fabrications consommatrices de charbon s'accroît rapidement. On a estimé que le coût en capital de nouvelles installations d'extraction et de traitement du charbon se situerait entre 5 et 10 dollars par tonne produite annuellement. Une centrale moderne, chauffée au charbon, pouvant consommer de 2,5 à 3 tonnes de charbon par an et par kilowatt de puissance installée, il faudrait prévoir un investissement de 15 à 25 dollars par kilowatt de puissance installée chaque fois qu'il faudrait créer de nouvelles installations minières.

L'utilisation, dans les mines de charbon, de nombreuses machines automatiques qui réduisent les coûts élevés de la main-d'œuvre viendrait augmenter le montant des investissements dans une proportion indéterminée mais certainement importante. On n'a pas évalué les investissements additionnels qu'il faudrait prévoir pour le matériel de transport.

Les coûts en capital des centrales chauffées au charbon varient quelque peu avec l'importance de la centrale, sans toutefois que ces variations se fassent rapidement sentir. Des données récentes, recueillies au sujet de six centrales à charbon dont la puissance installée s'étageait de 11 000 à 50 000 kilowatts, ont permis de calculer que le montant des investissements en capital était de 150 à 165 dollars par kilowatt, le chiffre moyen étant de 155 dollars. Ce prix s'abaisse même à 130 ou 135 dollars par kilowatt pour de très grandes centrales; il n'augmente pas sensiblement pour une centrale dix fois moins importante. Il faut cependant signaler que les petites centrales ont un moins bon rendement que les grandes, et que si l'on voulait leur donner un rendement élevé, on augmenterait très sensiblement leur prix de revient.

D'une façon générale, les centrales chauffées au gaz coûtent moins cher que les centrales chauffées au charbon ou au mazout, le prix de revient étant à peu près le même pour ces deux derniers types. Le prix de revient des centrales grandes ou moyennes chauffées au gaz ne dépasse pas 100 dollars par kilowatt. On a même cité le chiffre de 75 ou 80 dollars par kilowatt pour des centrales chauffées au gaz et d'un rendement relativement faible.

Le gaz naturel n'est cependant bon marché et abondant que dans certaines régions assez limitées des États-Unis d'Amérique. En fait, le gaz à bas prix, vendu par exemple de 5 à 10 cents les mille pieds cubes (environ 300 m³ — cette quantité s'exprime aussi comme : « 1 million de Btu, soit environ 250 000 kilocalories) appartient véritablement au passé, bien que certains contrats de vente soient encore en vigueur à ces prix-là. Les contrats conclus actuellement le sont sur la base d'un prix de 18 à 20 cents les 1 000 Btu (environ 250 kilocalories), et cette situation ne fera qu'empirer avec le temps. Mais quoi qu'il en soit, ces considérations ont peu d'importance, car nous ne croyons pas que l'énergie de source nucléaire soit appelée en premier lieu à concurrencer l'énergie à bon marché produite par le gaz ou par la force hydraulique.

Centrales hydrauliques

Le prix de revient global des centrales hydrauliques peut varier très largement. La plupart des grands projets sont à fins multiples, ce qui signifie que les dépenses d'établissement sont réparties entre la production de courant, la lutte contre les inondations, l'irrigation, la navigation, la conservation des espèces naturelles et du poisson, et les loisirs.

Actuellement, la plupart des sites qui se prêtent à la production à bon marché d'énergie hydro-électrique sont déjà équipés, sauf dans un petit nombre de cas où il n'existe pas de centre de consommation assez rapproché, et où le total des investissements s'est révélé trop élevé.

En Californie, la Pacific Gas and Electric Co. équipe continuellement de nouveaux sites pour compléter la production de ses générateurs fonctionnant au mazout, et il vaut la peine de noter que le coût de ces nouveaux travaux est de l'ordre de 300 à 325 dollars par kilowatt de puissance installée. Ces sites se trouvent pour la plupart à une distance de 100 à 150 milles (160 à 240 kilomètres) des grands centres de consommation.

Dans les centrales hydrauliques, le coût des groupes turbo-générateurs est fort peu élevé. Voici par exemple des chiffres caractéristiques publiés par la Federal Power Commission :

Kilowatt de puissance installée	*Investissements en dollars par kilowatt de puissance*
100	330
1 000	240
10 000	170
50 000	125
100 000	120
200 000	115

Le coût au kilowatt demeure presque constant à partir de 100 000 kW.

Il convient d'ajouter à ces chiffres le prix d'achat du terrain, les frais d'aménagement du terrain et de ses abords, le coût du barrage et des canaux de dérivation, dont l'ensemble peut s'élever à 100 dollars seulement par kilowatt pour des sites parti-

culièrement favorables et jusqu'à 1 000 dollars ou plus pour de vastes projets à fins multiples.

La durée de vie des centrales hydrauliques est longue : de quarante à cinquante ans. Les frais d'exploitation et d'entretien sont faibles et, puisque les frais de combustible sont nuls, on peut envisager dans de telles entreprises des investissements assez importants.

Centrales à combustion interne

Dans certaines régions des États-Unis d'Amérique où le charbon est cher, le transport difficile et la demande d'énergie électrique réduite à peu de chose, on a installé de nombreuses centrales à moteur diesel. Pour des centrales types de ce genre, la Federal Power Commission donne les chiffres approximatifs suivants :

Puissance installée kilowatts	*Investissements en dollars par kilowatt de puissance*			
	Équipement	*Bâtiments*	*Terrains*	*Total*
100 . . .	180	40	3	223
500 . . .	145	30	2	177
1 000 . . .	135	25	2	162
5 000 . . .	120	20	1	141
10 000 . . .	118	19	1	138
15 000 . . .	117	17	1	135

On constatera que l'économie devient très faible au delà de 5 000 kilowatts. Des chiffres récemment publiés montrent que le prix d'achat d'installations diesel sur rail ou sur plateforme mobile ne dépasse pas 90 dollars par kilowatt jusqu'à 1 000 kilowatts.

Ce type de centrale n'exige donc que des investissements peu élevés, mais sa durée de vie est considérée comme brève et ne dépasse sans doute pas dix à quinze ans. Les frais d'exploitation et d'entretien sont très élevés, et le combustible revient très cher. Le gas-oil se vend généralement 14 cents le gallon (environ 3,78 litres), soit environ 90 cents le million de Btu, alors que le charbon ne coûte que 25 à 35 cents le million de Btu dans les régions où son prix de vente est modéré. De ce fait, on doit compter sur un excédent du prix du combustible d'environ 4,5 millièmes de dollar par kilowatt-heure, ce qui équivaut à environ 140 dollars par kilowatt d'investissement supplémentaire, en tenant compte d'un coefficient de charge de 50 pour cent et de 14 pour cent de charges fixes par an.

Comparaison avec les centrales nucléaires

Il est en soi impossible de faire une comparaison exacte entre les centrales de type classique et les centrales électronucléaires. Mais certains avantages présentés par les centrales de type classique semblent de prime abord évidents : on peut construire des centrales classiques des dimensions les plus variées, en leur consacrant des investissements par kilowatt relativement peu importants, leur rendement et leur régularité de fonctionnement étant bien connus d'avance. En outre, si l'on tient compte des vastes réserves de combustibles d'origine fossile existant aux États-Unis, il paraît aller de soi que la création de centrales électronucléaires capables de soutenir la concurrence de centrales de type classique est une entreprise redoutable.

Nous n'avons cependant découvert aucune loi de la nature selon laquelle les centrales électronucléaires doivent obligatoirement coûter plus cher que les centrales de type classique; nous sommes même convaincus que les centrales électronucléaires et leurs installations auxiliaires peuvent trouver un champ d'application où elles soutiendront victorieusement la concurrence des autres. Si le charbon revient à 35 cents le million de Btu (ce qui est courant dans certaines régions étendues des États-Unis d'Amérique), cela équivaut à un investissement de 175 dollars par kilowatt, en tenant compte d'un coefficient de charge de 80 pour cent et de 14 pour cent de charges fixes par an. Par conséquent, on obtiendrait une importante marge d'économie en réduisant très sensiblement le prix de revient des combustibles nucléaires, ce qui permettrait d'absorber l'excédent d'investissement que réclame l'installation d'une centrale électronucléaire.

PERSPECTIVES D'AVENIR

Au cours des chapitres précédents, nous nous sommes efforcés de montrer les projets réalisés durant les années écoulées, aux États-Unis, dans la mise au point et l'installation de génératrices nucléaires. Sur la base des réalisations déjà acquises, et en prévoyant celles qui ne manqueront pas de leur succéder, nous pouvons maintenant examiner nos perspectives d'avenir.

En ce qui concerne les génératrices nucléaires elles-mêmes, nous avons déjà souligné que d'importantes réductions dans les investissements résulteront de la réunion de plusieurs unités sur un seul emplacement, de la construction de plusieurs unités selon un plan uniforme, et de la possibilité de fabriquer les éléments en séries importantes plutôt qu'à la pièce. On pourra obtenir des réductions du même ordre en appliquant des conceptions semblables à d'autres sections de l'industrie nucléaire.

On peut aussi escompter sans conteste des progrès techniques de grande importance qui provoqueront également une réduction des investissements grâce à la simplification des conceptions, à l'augmentation de la puissance des éléments de la centrale, à l'amélioration des rendements et à l'utilisation de matériaux et d'éléments d'un prix de revient moins élevé. En particulier, les traitements chimiques, l'élimination des déchets et la refabrication des matières combustibles sont autant de secteurs pour lesquels les dépenses en capital devraient être notamment réduites grâce aux progrès techniques qui seront réalisés au cours des prochaines années.

Les avantages financiers que l'on peut escompter de ce fait sont importants, mais ils ne peuvent encore être évalués avec une précision quelconque.

Nous sortons à peine d'une période où toutes les responsabilités étaient entre les mains des pouvoirs publics, qui établissaient leurs contrats sur la base du strict principe du prix de revient, augmenté d'un taux fixe de rémunération. Nous abordons maintenant une autre période, où c'est à l'industrie privée que reviendra la charge de concevoir et de construire de vastes centrales électronucléaires et de poursuivre, pour une part toujours plus grande, les travaux de recherche et d'application. Il y a toutes raisons de croire que l'industrie américaine, libre de ses décisions sur le plan technique, libre aussi à la phase de l'exécution, et ayant mis en jeu ses propres ressources financières, fera faire au problème de très grands et très rapides progrès. Des dispositions analogues ont permis dans le passé aux États-Unis de réaliser d'immenses progrès techniques dans d'autres domaines; nous avons la conviction qu'il en ira de même en ce qui concerne l'énergie nucléaire. L'industrie américaine paraît bien avoir accepté ce défi, et être de taille à gagner la partie.

Bien que dans le présent rapport nous n'ayons pas examiné en détail tel ou tel type particulier de pile, nous avons toujours fondé notre raisonnement sur un convertisseur thermique utilisant pour combustible de l'uranium faiblement enrichi et produisant du plutonium qui serait réutilisé comme combustible. On peut utilement mentionner deux autres types de piles, à savoir la pile régénératrice à neutrons rapides et la pile utilisant du thorium comme matière fertile et produisant de l'uranium-233 comme combustible à réutiliser.

La pile régénératrice à neutrons rapides tient tout ce qu'elle promettait et est capable de convertir presque intégralement son approvisionnement d'uranium naturel en produits de fission et en chaleur. Une telle pile réduirait les investissements prévus pour l'extraction et la préparation du minerai et pour l'enrichissement de l'uranium à une faible fraction de ce qu'exigent les convertisseurs thermiques. Il en résulterait des avantages économiques importants, et cette méthode aurait le mérite supplémentaire d'épargner nos ressources naturelles en uranium.

Nos travaux de recherche et d'application concernant les piles reproductrices à neutrons rapides se poursuivent à grande échelle. Il semble toutefois que ce type de pile soit plus difficile que d'autres à mettre au point et exige des travaux plus prolongés. Toutefois, nos réserves naturelles d'uranium sont encore assez abondantes, de sorte que la mise en action de cette pile n'est pas encore une nécessité économique inéluctable, et nous sommes convaincus qu'elle sera tout à fait au point avant que nos réserves en uranium ne se mettent à décliner. A ce moment, les déchets d'uranium appauvri, héritages de l'exploitation actuelle, pourront être récupérés et utilisés dans ce type de pile.

Mais la pile à neutrons rapides pose aussi certains graves problèmes. Les neutrons doivent être maintenus à une énergie aussi proche que possible des énergies de fission afin de réaliser la régénération désirée. Pour y parvenir, toutes les matières étrangères, y compris les substances utilisées pour la dilution, le refroidissement et les matériaux de construction, ainsi que les matières utilisées comme éléments ralentisseurs, doivent être tenues à l'écart du cœur.

De plus, le spectre rapide donne lieu à une masse critique importante; afin d'utiliser avec un rendement satisfaisant cette masse critique de matière fissile, il est indispensable qu'une grande quantité de chaleur soit engendrée dans le cœur de la pile rapide et qu'elle en soit éliminée. Ces différents points posent un problème technique difficile à résoudre. La matière combustible fortement radioactive du cœur ne peut être traitée qu'au prix de grandes difficultés. Dans l'état actuel des recherches, il faudrait envisager des investissements très élevés pour réaliser des piles régénératrices à neutrons rapides, surtout si on compare ces dépenses avec celles afférentes à d'autres types de piles. Mais avec le temps, nous devrions parvenir à construire ces piles à neutrons rapides à meilleur compte, tout en continuant à bénéficier des autres avantages qu'ils offrent.

Les piles thermiques utilisant le thorium comme matière fertile et recyclant l'uranium-233 pour l'utiliser comme combustible offrent l'avantage d'utiliser une matière fertile autre que l'uranium et relativement abondante. Elles permettent également la régénération sans présenter tous les inconvénients de la pile à neutrons rapides. N'oublions pas, toutefois, que pour faire démarrer ces piles, il est nécessaire de leur donner pour combustible de l'uranium-233 fortement enrichi, ou du plutonium.

Les travaux visant à l'utilisation du thorium portent surtout sur la mise au point de la pile homogène aqueuse à deux régions et de la pile à graphite-sodium. Ces types de piles, si on les alimente au thorium, devraient offrir certains avantages financiers en ce qui concerne l'investissement nécessaire à la mise en marche d'une centrale électronucléaire complètement installée.

Mais dans le cas du thorium, on se heurte aussi à certaines difficultés qui lui sont propres et qui, sans être plus insurmontables que celles de l'uranium, sont différentes. Étant donné qu'il a fallu, de toute façon, installer d'abord des centrales à l'uranium, le thorium n'a été étudié qu'avec un certain retard. En outre, comme le thorium doit être utilisé de préférence avec des piles à deux régions plutôt qu'avec les piles à une région qui fonctionnent à l'uranium, des problèmes supplémentaires surgissent. Le recyclage de l'uranium-233 présente des difficultés semblables à celles que l'on rencontre dans la réutilisation du plutonium (qui n'a pas encore été réalisée); ces difficultés sont dues à l'activité alpha élevée de l'uranium-233. Mais au cours des prochaines années, nous assisterons sans doute aux progrès des piles au thorium, auxquelles on s'intéressera de plus en plus.

CONCLUSIONS

Tout ce qui précède démontre clairement que, dans l'état actuel de nos connaissances, nous ne pouvons évaluer que difficilement et de façon fragmentaire les investissements en capital nécessaires à une industrie de production d'électricité de source nucléaire. Nos connaissances dans ce domaine devraient marquer de sérieux progrès d'ici quelques années.

Il est de toute évidence indispensable que les recherches techniques se poursuivent avec succès dans de nombreux domaines. Nous devons aboutir à des résultats satisfaisants dans chacun d'eux; tout échec dans l'un des secteurs clés entraînerait le maintien de prix si élevés que l'ensemble de la production d'électricité de source nucléaire s'en trouverait compromis. Faute de trouver une solution satisfaisante au problème posé par la fabrication des cartouches combustibles ou par le traitement chimique, la production d'énergie de source nucléaire pourrait se révéler irréalisable dans des conditions rentables.

Nous insistons sur le fait que les coûts d'extraction et de traitement du minerai d'uranium et d'enrichissement de l'uranium, s'ils sont élevés, ne le sont cependant pas assez en eux-mêmes pour faire obstacle à l'essor de cette production.

De même, les coûts en capital des centrales électronucléaires elles-mêmes, évaluées dans un esprit réaliste, sont assez faibles pour autoriser des espoirs. Nous croyons qu'à la longue ces centrales finiront par ne pas coûter plus cher que les centrales de type classique, mais ce résultat est encore lointain, et il ne pourra sans doute être acquis que lorsque des types améliorés de génératrices nucléaires auront été mis au point.

Quant aux perspectives qui s'offrent en ce qui concerne l'étude et la construction de petites centrales électronucléaires d'un prix de revient relativement peu élevé, elles sont également encourageantes, encore qu'il s'agisse ici, de l'avis général, d'une tâche plus difficile et de plus longue haleine que la mise au point de grandes génératrices nucléaires. Il ne paraît pas moins raisonnable d'escompter la mise en service de piles capables de produire de la chaleur et d'effectuer des traitements chimiques, sans qu'il soit nécessaire d'utiliser à ces fins des sous-produits radioactifs.

Ces diverses tâches exigeront sans doute des investissements financiers très importants. Ces investissements devront être effectués avec prudence, et une collaboration aussi étroite que possible devra s'établir entre tous ceux qui participent à la recherche nucléaire, afin d'éviter les doubles emplois. Ainsi, les résultats obtenus seront profitables à l'humanité tout entière.

Compte rendu de la séance 3.2

Mardi 9 août 1955 (matin)

Président : Sir John Cockcroft (Royaume-Uni)

Secrétaires scientifiques : MM. F. de Hoffmann et N. Dobrotine

PROGRAMME

P/391	Les investissements nécessaires pour l'exploitation de l'énergie nucléaire	J. M. Hill et S. W. Joslin
P/477	Les investissements nécessaires pour l'exploitation de l'énergie nucléaire	W. K. Davis

M. Hill (Royaume-Uni) présente le mémoire P/391.

M. W. K. Davis (États-Unis d'Amérique) présente comme suit le mémoire P/477 : L'utilisation industrielle de l'énergie nucléaire pour la production d'électricité exige des investissements considérables. Il en est ainsi surtout si l'on envisage toutes les phases de l'industrie de l'énergie nucléaire, depuis l'extraction de l'uranium ou du thorium jusqu'au traitement chimique des combustibles irradiés. L'industrie de l'énergie nucléaire semble avoir pour caractéristique de ne pouvoir être créée à échelle réduite ou à peu de frais. Il n'est toutefois pas nécessaire, pour réaliser des progrès importants, de s'engager dans des programmes aussi considérables que ceux qui ont été entrepris par les États-Unis d'Amérique ou le Royaume-Uni.

Les dépenses d'investissement peuvent être réduites si des pays mettent en commun leurs connaissances et leurs techniques et se fournissent réciproquement des services, des matières et de l'équipement. Aux États-Unis, nous avons la conviction d'entrer dans une ère où notre pays sera à même de faire profiter le reste du monde des investissements considérables qu'il a consacrés à l'énergie nucléaire et qu'ainsi il pourra réduire sensiblement les dépenses d'équipement des autres pays.

Le mémoire examine l'ordre de grandeur de certains investissements nécessaires pour la production d'énergie électronucléaire telle qu'elle se développe actuellement aux États-Unis, ainsi que la part qui revient aux dépenses d'investissement dans l'ensemble des coûts, et il établit certaines comparaisons avec les réseaux électriques de type classique. Étant donné la grande diversité des installations, la complexité du problème et le manque d'expérience à l'échelle industrielle, il a fallu se borner à une étude assez générale. De nombreuses et importantes questions de caractère technique et économique sont encore à résoudre, non seulement pour les grandes centrales que l'on envisage de construire aux États-Unis, mais surtout pour les petites centrales nucléaires qui pourraient être utilisées dans le monde entier et dans certaines régions des États-Unis.

La Commission de l'énergie atomique des États-Unis se propose de mettre au point la technologie d'un ou de plusieurs types de génératrices nucléaires afin de les rendre aptes à soutenir la concurrence des centrales les plus perfectionnées utilisant les combustibles classiques. L'industrie américaine sera sans doute chargée de construire, en faisant appel à cette technologie, des centrales nucléaires qui serviront de prototypes, ainsi que des centrales nucléaires commerciales. On ne cesse d'étudier de nouvelles applications de la chaleur nucléaire et de nouveaux types de piles et lorsqu'il le faut, ces recherches sont intégrées au programme.

Nous estimons que ce programme permettra de disposer aux États-Unis, vers 1960, d'une puissance installée de 1 million de kilowatts d'énergie électronucléaire et que, en 1975 ou 1980, les centrales nucléaires des États-Unis auront une puissance équivalente au total de la puissance installée actuelle, qui est de 100 millions de kilowatts environ. Un tel développement dépend, bien entendu, du succès que connaîtra le programme relatif aux génératrices nucléaires, lequel en est encore à ses débuts et se trouve en pleine expansion.

Remarques générales sur les dépenses d'investissement

Les dépenses d'investissement se retrouvent dans le prix de revient total de l'énergie sous forme de frais fixes. Ces frais fixes, ajoutés aux frais d'exploitation, donnent le prix de revient total de l'énergie électrique. Quoiqu'il soit assez difficile de distinguer et de définir de façon satisfaisante les frais fixes et les frais d'exploitation afférents à l'ensemble d'un réseau électrique, la plus grande difficulté provient du fait que la détermination des frais fixes en fonction des dépenses d'investissement peut varier. Aux États-Unis, elle varie selon le mode de financement; les différences sont encore plus marquées à cet égard entre les autres pays, de sorte qu'il devient très difficile de comparer les prix de revient de l'énergie électrique produite dans les centrales classiques et dans une centrale nucléaire.

Les frais fixes sont souvent exprimés en pourcentage des dépenses d'investissement et se répartissent en trois rubriques principales qui sont : le remboursement du capital investi — qui s'échelonne normalement sur toute la durée utile de la centrale —, les intérêts et dividendes des sommes investies, et certains frais fixes tels que les impôts fonciers et les frais d'assurance.

De ces trois rubriques, c'est la deuxième, c'est-à-dire les intérêts et dividendes versés sur les sommes investies, qui varie le plus. Elle comprend l'intérêt versé sur les obligations, que celles-ci soient émises par l'État ou par des sociétés privées, ainsi que les dividendes sur le capital-actions, intérêt ou dividendes dont le montant varie selon l'importance des risques assumés; cette rubrique doit également tenir compte des impôts sur le revenu. Le capital-actions devra donc produire un revenu brut parfois très élevé pour que l'on obtienne, impôts déduits, le revenu net recherché.

Le facteur amortissement présente une certaine importance dès lors que la durée d'utilisation des premières centrales nucléaires semble devoir être sensiblement plus courte que celle des centrales de type classique. La rubrique où l'on tient compte des impôts fonciers et des frais d'assurance n'est pas très importante; elle sera même inexistante si les projets sont financés par l'État plutôt que par des sociétés privées.

D'après ces différents facteurs, on a pu dresser le tableau suivant qui indique le montant des frais fixes, c'est-à-dire les pourcentages des immobilisations :

Exemple A : Entreprise à risque élevé, capitaux privés : 50 pour cent par an.

Exemple B : Entreprise à risque normal, capitaux privés : 14 pour cent par an.

Exemple C : Entreprise sans risque, capitaux privés : 9 pour cent par an.

Exemple D : Projet financé par l'État : 5 1/4 pour cent par an.

Les différences peuvent donc être très marquées. Si l'on considère une centrale nucléaire dont le coût est de 250 dollars par kilowatt et qui produit 7 000 kWh par année et par kilowatt de puissance installée, les frais fixes se monteront, dans le cas de l'exemple B (risque normal, capitaux privés), à 0,005 dollar par kilowattheure. Pour la même centrale financée par l'État selon l'exemple D, le kilowattheure coûterait seulement 0,001 9 dollar, ce qui fait une différence de 0,003 1 dollar par kilowattheure ou 30 à 40 pour cent du prix de revient total de l'énergie.

On constate des variations encore plus grandes dans d'autres pays ayant recours à des modes de financement différents. Il est impossible d'établir une comparaison valable des coûts de production, qu'il s'agisse d'énergie nucléaire ou autre, sans réduire les frais fixes à une base commune.

Ordre de grandeur des dépenses d'investissement

Le mémoire contient des évaluations des frais d'investissement, qui, toutes, se rapportent au kilowatt de puissance installée et concernent une génératrice nucléaire type, que l'on a supposée être une pile hétérogène brûlant de l'uranium faiblement enrichi et produisant de l'énergie thermique avec un rendement global de 30 pour cent environ. On a supposé que le facteur de charge était de 70 ou 80 pour cent. On a admis que l'exploitation se ferait à l'échelle des États-Unis et l'on est parti d'hypothèses raisonnables sur le plan technique.

Certes, pour d'autres types de génératrices nucléaires, les calculs pourront être différents ou plus complexes que dans l'exemple choisi. Toutefois, les chiffres cités dans ce mémoire devraient correspondre assez bien au cas d'un réseau général d'énergie électronucléaire tel que celui qui est à l'étude.

Les diverses opérations relatives au combustible — extraction, concentration et affinage du minerai — représentent un montant assez faible, quelque 2 à 4 dollars par kilowatt, ou même moins.

Le coût des installations d'enrichissement dépend dans une large mesure du type de pile utilisé; il s'établit normalement entre 40 et 80 dollars par kilowatt pour une pile convertisseuse hétérogène à neutrons thermiques brûlant un combustible faiblement enrichi dans des cartouches actives de durée moyenne.

Le coût afférent à de grandes usines de fabrication de cartouches actives à partir de matières nouvelles peut représenter environ 5 dollars par kilowatt desservi alors que s'il s'agit de cartouches actives contenant du plutonium ou de l'uranium-233, ce coût pourrait s'élever jusqu'à 15 dollars ou plus par kilowatt. Toutefois, on ne possède guère d'expérience en ce qui concerne ce deuxième genre d'installations.

Le coût des usines de production d'eau lourde est d'environ 30 à 50 dollars par kilowatt d'électricité, c'est-à-dire du même ordre de grandeur que le coût des installations d'enrichissement.

Quant aux centrales nucléaires elles-mêmes, leur coût s'établirait, selon les évaluations actuelles, entre 200 et 250 dollars par kilowatt, ou même plus; ces chiffres se rapportent à des installations de très grande puissance qui doivent entrer en service d'ici quatre ou six ans, après quelques études complémentaires. Dans le cas où l'on construirait non pas une, mais plusieurs centrales d'un même type, ou plusieurs centrales au même emplacement, leur coût par kilowatt pourrait être nettement réduit. En revanche, pour de petites centrales de 10 000 à 50 000 kW, le coût du kilowatt installé serait sensiblement plus élevé.

La valeur du combustible nucléaire nécessaire à une centrale atomique représente un montant appréciable, qui peut atteindre de 20 à 40 dollars par kilowatt, si l'on compte non seulement le combustible dans la pile, mais également les matières en fabrication et en cours de traitement. Ce coût peut être réduit dans de fortes proportions pour certains types de piles (tels que la pile homogène à solution aqueuse).

Le terrain nécessaire pour l'aménagement d'une centrale électronucléaire aura parfois une superficie égale à plusieurs fois celle d'une centrale ordinaire en raison des dangers qu'elle peut présenter. Le coût du terrain peut donc augmenter fortement les dépenses d'investissement s'il s'agit d'un terrain coûteux où la superficie ne peut être réduite par l'isolement des installations *(containment)* ou par d'autres moyens de protection. Cet isolement peut représenter une dépense de 10 à 20 dollars par kilowatt dans le cas de grandes installations, et revient probablement moins cher qu'une grande superficie de terrain.

Les usines de traitement des cartouches actives irradiées sont aujourd'hui très coûteuses à moins d'être très grandes. Or, étant donné le petit nombre des centrales nucléaires et leur diversité, il est très difficile de construire une installation pour le traitement chimique des cartouches de combustible qui soit à la fois peu coûteuse et souple, surtout si les cartouches sont de longue durée et si, de ce fait, les quantités d'une même matière pouvant être traitées simultanément se trouvent encore réduites. Le coût d'une installation de taille convenable pourra descendre jusqu'à 30 dollars par kilowatt desservi; toutefois, les usines qui seront construites dans un proche avenir pour les besoins d'un petit nombre de génératrices nucléaires coûteront peut-être deux fois plus.

Les dépenses totales d'investissement pour un réseau d'énergie électronucléaire du type considéré représentent environ 350 dollars par kilowatt desservi. On devrait pouvoir arriver à ce coût pour les centrales dont la construction commencera au cours de ces prochaines années et à le réduire d'un tiers au cours des cinq ou dix années à venir.

Investissements nécessaires à la construction de centrales de type classique

Il est intéressant de comparer les dépenses d'investissement nécessaires à la construction de centrales de type classique et de centrales électronucléaires, bien que les données ne soient pas exactement comparables. Il faut reconnaître que les dépenses d'investissement dans le cas des centrales de type classique peuvent être réduites grâce à des progrès techniques, qui pourraient résulter de l'expérience acquise avec les centrales nucléaires.

Le coût des nouvelles centrales à charbon construites aux États-Unis n'est pas uniforme, mais il semble que la construction des grandes centrales les plus modernes et les plus perfectionnées revienne à 130 ou 135 dollars par kilowatt. Il est d'usage de compter un stock d'une tonne de charbon par kilowatt, ce qui augmente le coût de 6 à 8 dollars. Les nouvelles installations d'extraction et de traitement du charbon représentent une dépense de 15 à 25 dollars par kilowatt, ce qui établit le coût total des investissements à environ 160 dollars par kilowatt, non compris les dépenses d'équipement nécessitées par le transport du charbon, et dont le montant peut représenter quelques dollars par kilowatt s'il s'agit de moyens très importants.

De petites centrales, d'une puissance de 10 000 à 50 000 kW, peuvent coûter 20 à 30 dollars de plus par kilowatt, tout en ayant un rendement inférieur à celui des grosses centrales. A l'ordinaire, les centrales à gaz, qui brûlent du gaz naturel bon marché, sont moins coûteuses que les centrales à charbon.

Bien entendu, les dépenses globales d'investissement sont aujourd'hui, pour une centrale nucléaire, environ le double de celles d'une centrale de type classique, et il en sera encore ainsi pendant un certain temps. Néanmoins, l'impulsion vigoureuse qu'ont reçue aux États-Unis les recherches sur de nombreux types de piles permettra sans doute de réduire considérablement les prix de revient, grâce à des méthodes de fabrication à l'échelle industrielle et à une technique plus perfectionnée, si bien que les centrales électronucléaires pourraient rivaliser, quant aux dépenses d'investissement, avec les centrales de type classique, tant aux États-Unis que dans d'autres pays.

Conclusions

D'après les données qui figurent dans ce mémoire, on peut voir que nos connaissances actuelles concernant les investissements nécessaires pour la production d'énergie électronucléaire sont pour le moins fragmentaires et imprécises. D'ici quelques années, nous seront certainement mieux à même d'évaluer ces dépenses d'investissement.

L'importance des dépenses en capital, on l'a vu, peut varier considérablement d'un pays à l'autre selon la façon dont ces dépenses sont réparties en vue du calcul du prix de revient global de l'énergie. Par exemple, les dépenses en capital relativement

élevées qu'entraîne la construction d'une centrale nucléaire pourraient être un obstacle moins redoutable dans des pays où l'État fournirait des capitaux à un taux d'intérêt très faible.

Il est certain que des progrès doivent être réalisés dans des domaines techniques très variés. Il faut obtenir des résultats satisfaisants dans chacun de ces domaines car un échec sur un point important peut se répercuter sur l'ensemble de la production d'énergie électronucléaire et maintenir celle-ci à un taux prohibitif. Par exemple, s'il n'est pas trouvé une solution adéquate à certaines questions intéressant la fabrication des cartouches de combustible ou leur traitement chimique, l'électricité d'origine nucléaire ne sera peut-être jamais rentable.

Il faut remarquer que les dépenses afférentes à l'extraction et au traitement du minerai d'uranium, ainsi qu'à l'enrichissement de l'uranium, si elles sont considérables, ne pourraient cependant à elles seules empêcher l'énergie électronucléaire d'être produite à un prix intéressant.

De même, les dépenses en capital afférentes aux centrales nucléaires elles-mêmes, si on les évalue d'une façon réaliste, s'établissent à un niveau assez encourageant. Nous estimons même qu'elles finiront par ne pas dépasser le coût des centrales de type classique; il s'agit là, cependant, d'une perspective à long terme, qui exigera sans doute la mise au point de génératrices nucléaires plus perfectionnées.

La construction de petites centrales relativement peu coûteuses offre des perspectives encourageantes, même si elle pose des problèmes dont la solution est plus complexe et plus lointaine que pour les grandes centrales électronucléaires. Il semble que l'on soit fondé également à envisager l'utilisation des piles atomiques soit comme moyen de chauffage, soit pour des traitements chimiques, sans parler des sous-produits radioactifs qui pourraient être utilisés aux mêmes fins.

Les investissements considérables que ces tâches exigent manifestement devront être effectués de façon judicieuse et avec le concours le plus étroit de tous ceux qui travaillent dans ce domaine, afin d'éviter des doubles emplois fâcheux. Les résultats ainsi obtenus profiteront à tous les hommes.

Séances 4.1 et 4.2

LISTE DES MÉMOIRES

4.1 — Étude économique de la production d'énergie électronucléaire

			Pages
P/476	Aspects économiques de la production d'énergie électronucléaire	J. A. Lane	361
P/390	Prix de revient de l'énergie et valeur marchande du plutonium provenant des premières centrales nucléaires	J. A. Jukes	375
P/798	Importance, pour l'économie de l'énergie électronucléaire, des facteurs inhérents aux phases thermique et électrique du processus de production	J. Bečvář et A. Ševčík	382

4.2 — Le rôle du thorium

P/867	Le rôle que peut jouer le thorium dans la production d'énergie nucléaire	J. V. Dunworth	392

Aspects économiques de la production d'énergie électronucléaire

par James A. Lane*

En 1975, la production d'électricité atteindra, aux États-Unis d'Amérique, 1 400 milliards de kilowattheures ($1{,}4 \times 10^{12}$ kWh), selon les estimations faites, entre autres, par la Paley Commission [1, 2] **.

La majeure partie de cette énergie sera fournie par la combustion de charbon, de pétrole et de gaz; un pourcentage moins élevé proviendra des centrales électronucléaires. La valeur exacte de ce pourcentage dépend de la manière dont le programme actuel de développement des piles permettra de résoudre les nombreux problèmes techniques dont dépend l'économie de l'énergie nucléaire. Pour l'instant, on ne peut encore que préciser la nature de ces problèmes, ce que l'on fait en vue de les résoudre, et les perspectives qu'entraînerait leur solution satisfaisante. Si l'estimation précédente relative à l'accroissement de la production d'énergie électrique au cours des vingt prochaines années sous-entend un investissement *virtuel* dans les centrales nucléaires d'environ 30 milliards de dollars, cela signifie que l'on doit pouvoir attendre beaucoup du succès du programme envisagé. Les réalisations techniques déjà effectuées aux États-Unis dans le cadre de ce programme constituent un encouragement supplémentaire à hâter le développement des génératrices nucléaires destinées à des applications civiles.

Les États-Unis disposent de deux voies en vue de développer la technologie des génératrices nucléaires de grande puissance. Ce sont : *a*) le programme quinquennal de la Commission de l'énergie atomique relatif aux génératrices nucléaires destinées à des applications civiles; *b*) les projets industriels concernant des piles de démonstration. Il est utile de passer en revue ces programmes en examinant les possibilités qu'ils présentent de produire de l'énergie nucléaire de façon économique.

PROGRAMMES DE DÉVELOPPEMENT DES PILES

Programme quinquennal de la Commission de l'énergie atomique (AEC) concernant les génératrices nucléaires destinées à des applications civiles

Ce programme, que la Commission de l'énergie atomique fit connaître l'an passé, prévoit la construction d'une centrale électronucléaire équipée d'une génératrice nucléaire grandeur nature du type à eau sous pression, ainsi que celle de prototypes, de dimensions intermédiaires, ou d'échelle

Original : anglais.

* Laboratoire National d'Oak Ridge.

** Les numéros entre crochets renvoient à la bibliographie qui figure à la fin du mémoire.

Tableau 1

Programme quinquennal de la Commission de l'énergie atomique concernant les génératrices nucléaires destinées à des applications civiles

Type de pile	Laboratoire de la Commission de l'énergie atomique	Puissance en MW		Coût [a] en millions de dollars	Date prévue de la réalisation
		Thermique	Électrique		
Eau sous pression (PWR) . .	Westinghouse	264	60	85	1957
Eau bouillante (EBWR) . . .	Argonne	20	5	17	1956
Sodium et graphite (SGR) . .	North American	20	—	10	1956
Pile autorégénératrice à neutrons rapides (EBR 2) . .	Argonne	62,5	15	40	1958
Pile homogène expérimentale (HRE 2)	Oak Ridge	5	1	3	1956
Pile autorégénératrice homogène au thorium (TRB) .	Oak Ridge	65	16	44	1959

[a] Y compris quelques travaux de recherche et d'amélioration.

réduite, d'autres genres de piles qui semblent devoir produire de l'énergie à bas prix. On a dressé la liste de ces piles dans le tableau 1. Il faut remarquer qu'environ 200 millions de dollars seront nécessaires au financement de ce plan durant les cinq prochaines années, cette somme étant actuellement prévue pour la construction et l'exploitation expérimentale de toutes ces piles. La construction de ces prototypes de centrales permettra non seulement de recueillir des données qui indiqueront comment diminuer les prix, mais encore d'évaluer plus exactement les possibilités d'appliquer l'énergie nucléaire à la production d'énergie sur le plan industriel.

Projets industriels concernant les piles de démonstration

Divers groupes industriels des États-Unis étudient actuellement un programme plus hardi, comportant la construction de centrales électronucléaires de grande puissance. On en a établi la liste dans le tableau 2. Sauf dans le cas du projet de la Consolidated Edison, qui serait entièrement réalisé grâce à des capitaux privés, ces projets impliquent une aide de la part du gouvernement. Cette aide comprend l'exonération, pendant sept ans au maximum, des taxes établies par la Commission de l'énergie atomique sur les avances de combustibles nucléaires et d'éléments fertiles, l'appui des laboratoires de l'AEC qui effectueraient, sans redevances, certains travaux de recherche et de perfectionnement, et l'achat anticipé par l'AEC des renseignements techniques et économiques à obtenir. Si toutes ces propositions sont agréées, la puissance installée des centrales électronucléaires des États-Unis atteindra environ 800 000 kilowatts autour de 1960.

Tableau 2

Projets industriels concernant des piles de démonstration

Type de pile	Groupement responsable	Puissance électrique en mégawatts	Coût en millions de dollars	Date prévue de la réalisation
Eau sous pression . . .	Yankee Atomic Electric	100	24	1957
Eau bouillante	Commonwealth Edison (Nuclear Power Group)	180	45	1960
Sodium et graphite . .	Consumers Public Power District	75	24	1959
Pile autorégénératrice à neutrons rapides . .	Detroit Edison	100	45	1958
Eau sous pression . . .	Consolidated Edison [a]	236	55	1959

[a] Licence demandée pour la construction avec des capitaux privés.

Types de génératrices nucléaires et de piles choisis

Le programme de construction de prototypes de la Commission de l'énergie atomique et les projets industriels de réalisation de génératrices nucléaires de grande puissance concernent tous deux les types de piles dont l'étude a montré qu'on devait pouvoir en attendre une production d'énergie capable d'affronter la concurrence. Il s'agit : *a*) de la pile à eau sous pression (PWR); *b*) de la pile à eau bouillante (BWR); *c*) de la pile au sodium et au graphite (SGR); *d*) de la pile autorégénératrice à neutrons rapides (FBR); et *e*) de la pile autorégénératrice homogène à solution aqueuse au thorium (TBR). Les figures 1 à 5 sont des diagrammes schématiques de ces diverses piles. Dans la *pile à eau sous pression* (fig. 1), dont un modèle grandeur nature est actuellement construit par Westinghouse, on peut utiliser soit l'eau lourde, soit l'eau ordinaire comme réfrigérant et ralentisseur, en réglant d'une façon appropriée l'espacement et l'enrichissement des cartouches de combustible. (La pile Westinghouse utilise l'eau ordinaire.) On pompe l'eau entre les barres de combustible solide dans le cœur de la pile, et de là, elle passe dans un échangeur thermique où est produite de la vapeur qui actionne une turbine. Dans la *pile à eau bouillante* (fig. 2) (utilisant aussi bien H_2O que D_2O), on produit directement de la vapeur en laissant l'eau bouillir au cœur de la pile. Cette méthode de transfert de chaleur élimine l'échangeur thermique, présente en conséquence des rendements thermiques plus élevés, et permet de réduire les dimensions des pompes et d'autres organes. Ces avantages sont contrebalancés par la nécessité d'un plus grand enrichissement du combustible à cause de la présence de vapeur d'eau dans le cœur de la pile, et par l'obligation de mettre la turbine et le condenseur sous blindage en raison de la radioactivité de l'eau.

La *pile au sodium et au graphite* (fig. 3) tire ses avantages des hautes températures et des rendements thermiques élevés que permet l'utilisation du sodium liquide comme réfrigérant et du graphite comme ralentisseur. Ici, le sodium utilisé comme réfrigérant primaire circule entre les éléments combustibles solides de la pile, et passe ensuite dans un échangeur thermique où la chaleur est transférée à un système secondaire de circulation de sodium. Contrairement au sodium primaire qui devient radioactif, le sodium secondaire peut traverser un générateur de vapeur extérieur au blindage. On peut également appliquer à la *pile autorégénératrice à neutrons rapides* (fig. 4)

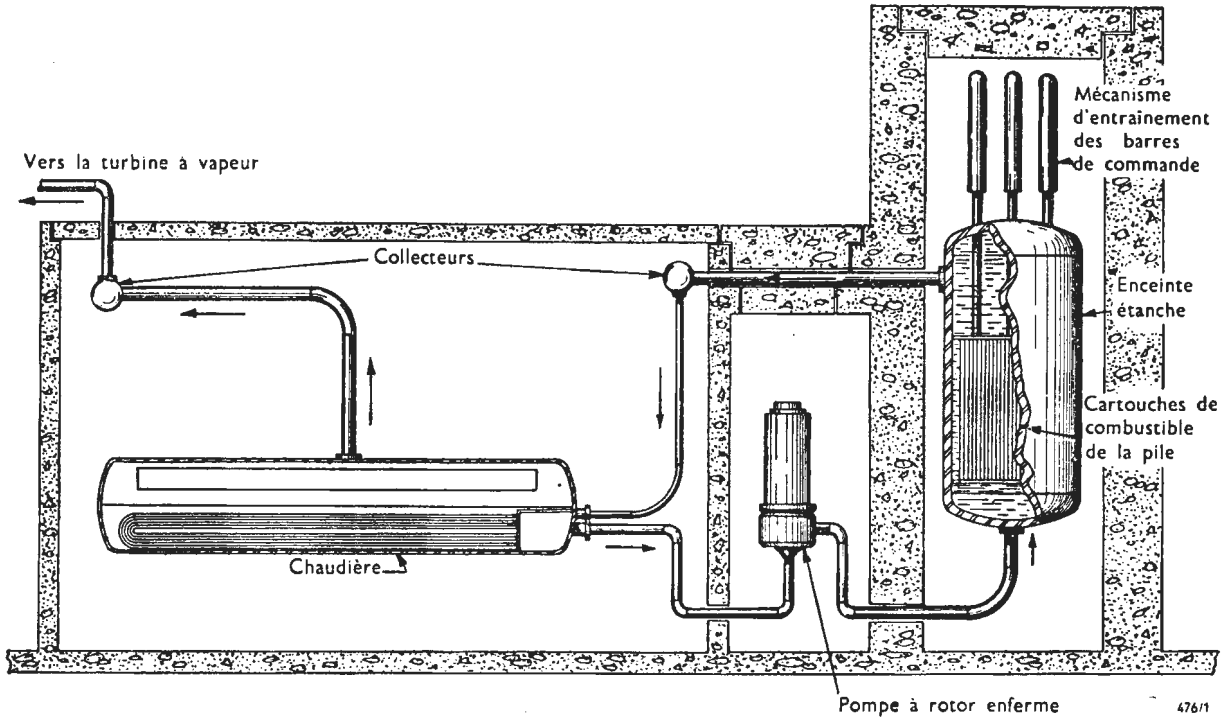


Figure 1. — Schéma de la pile à eau sous pression (circulation forcée d'H_2O ou de D_2O).

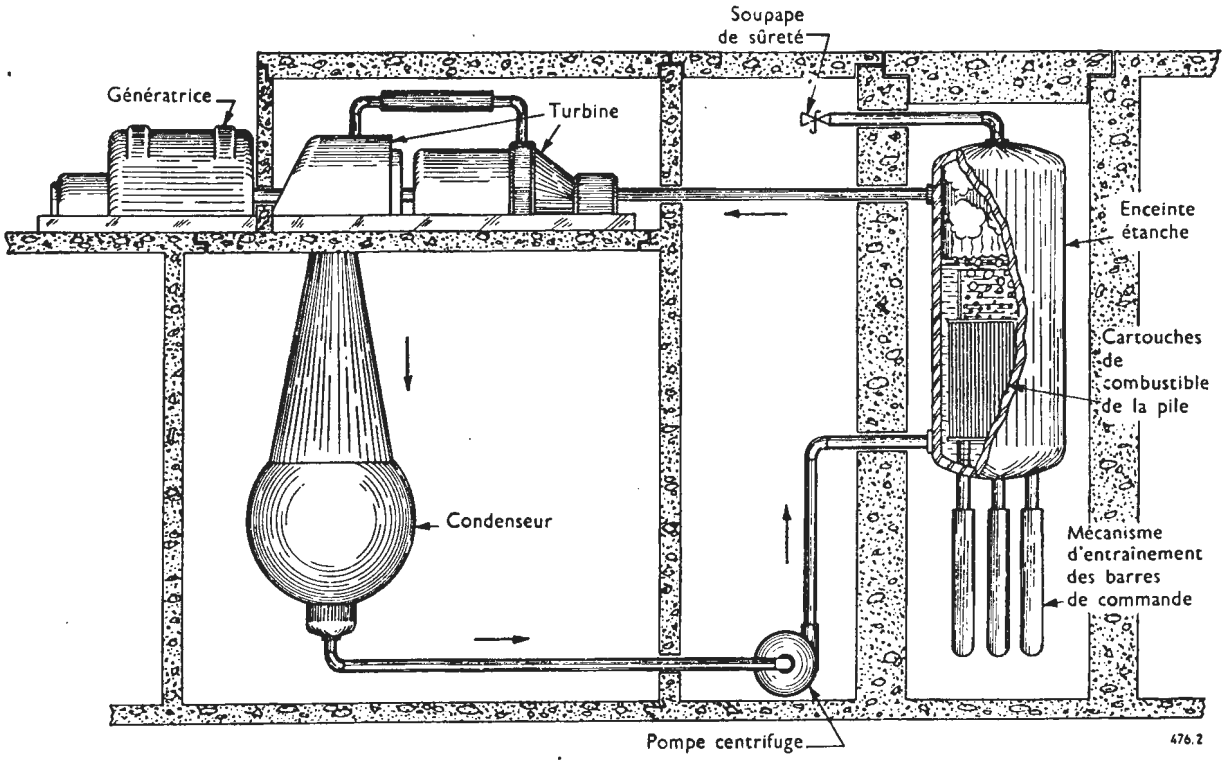


Figure 2. — Schéma de la pile à eau bouillante.

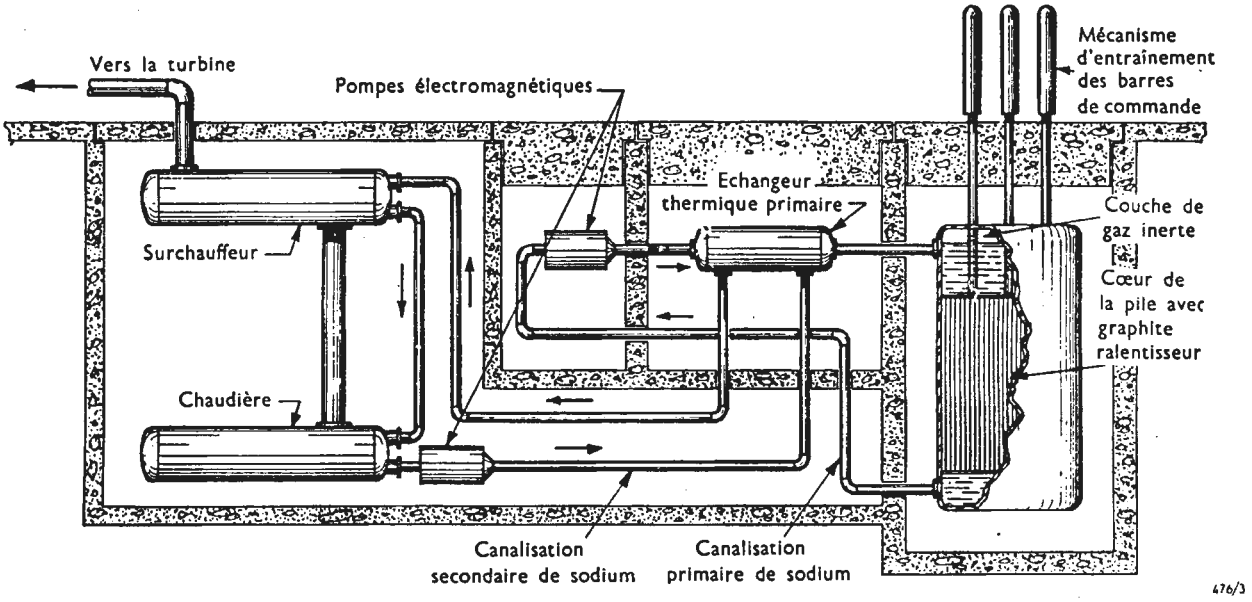


Figure 3. — Schéma de la pile au sodium et au graphite.

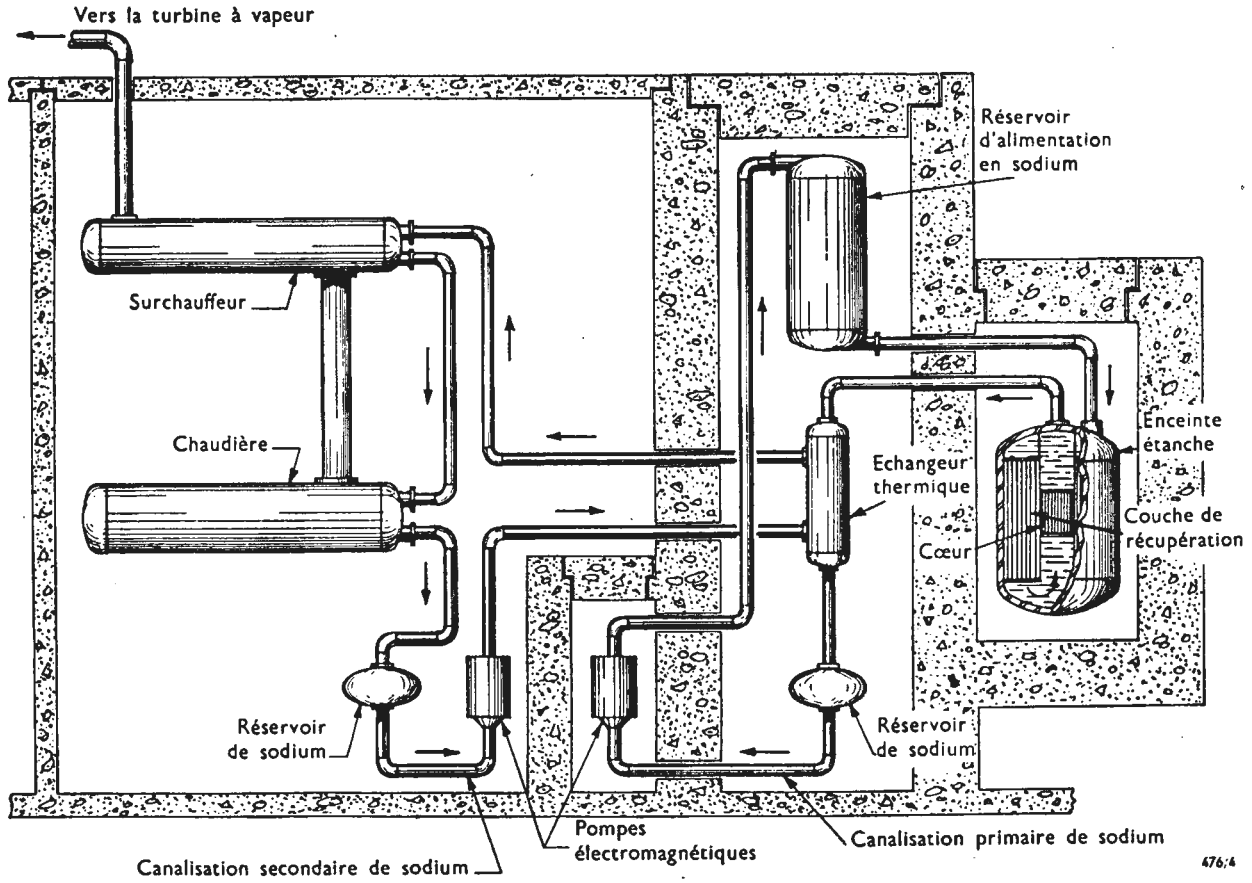


Figure 4. — Schéma de la pile à neutrons rapides refroidie au sodium.

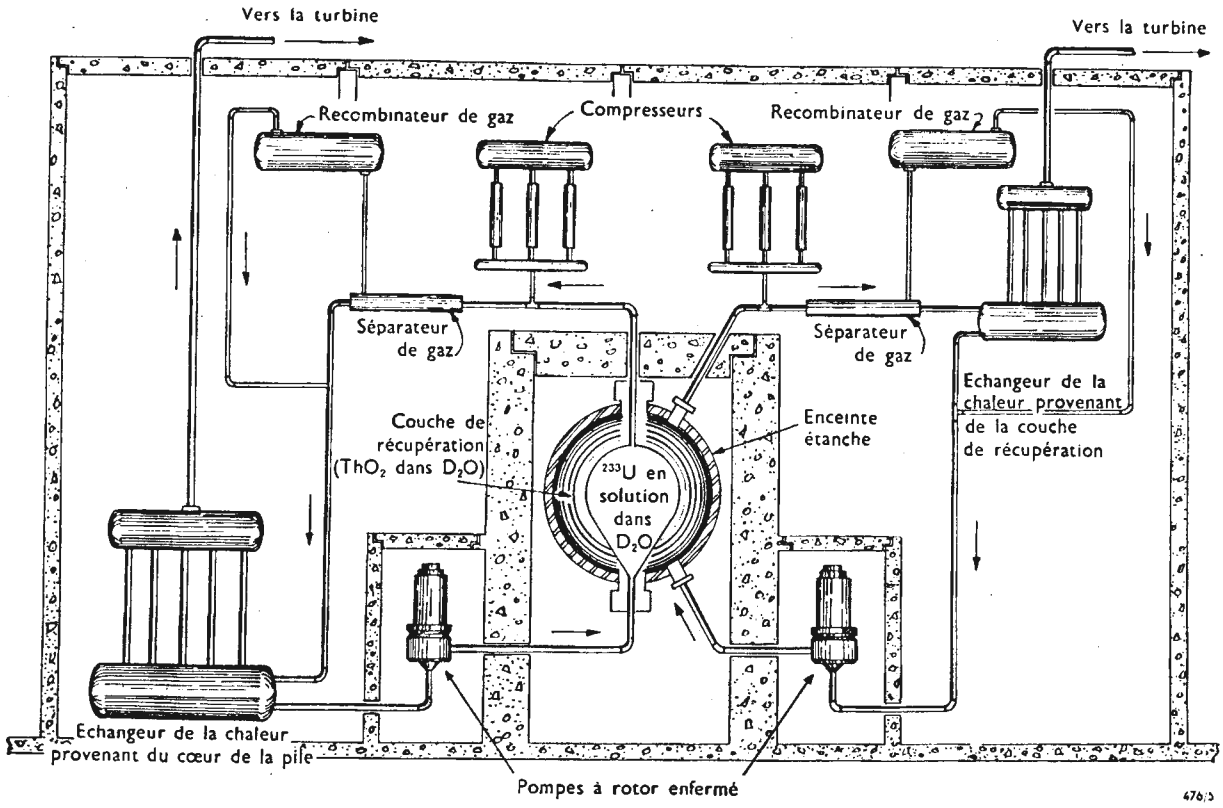


Figure 5. — Schéma de la pile autorégénératrice homogène à solution aqueuse au thorium.

l'utilisation du sodium comme réfrigérant pour les hautes températures. Dans ce cas, le cœur de la pile ne comporte pas de ralentisseur; elle est alimentée en plutonium contenant un peu d'uranium-238, et entouré d'une couche d'uranium-238. On utilise le sodium primaire pour refroidir à la fois le cœur de la pile et la couche d'uranium, en même temps qu'un circuit secondaire de sodium, comme dans le cas de SGR. L'avantage de la pile à neutrons rapides réside dans le gain de régénération élevé que l'on peut obtenir grâce aux neutrons rapides du système plutonium-239, uranium-238, en raison de la plus faible capture sans fission des neutrons par le plutonium-239. D'autre part, les piles à neutrons rapides exigent une grande quantité de combustible nucléaire pour atteindre l'état critique, ce qui entraîne des frais élevés de première installation.

La *pile homogène à solution aqueuse* (fig. 5), enfin, utilise une solution diluée d'uranium-233 dans l'eau lourde, circulant dans un récipient intérieur où la plus grande partie de la chaleur est engendrée. Le cœur de la pile est entouré d'un grand récipient sous pression dans lequel on fait passer une suspension d'oxyde de thorium dans l'eau lourde, le thorium servant de couche autorégénératrice. La solution du cœur de la pile et la suspension d'oxyde de thorium passent toutes deux dans des échangeurs thermiques où se produit la vapeur. L'avantage qui résulte de l'utilisation d'un combustible et d'une couche d'autorégénération, liquides l'un et l'autre, consiste principalement en ce que les traitements chimiques peuvent être simplifiés, ce qui diminue le coût de production du combustible. Cependant, tant les solutions d'uranium que les suspensions de thorium sont quelque peu corrosives, hautement radioactives, et exigent en général des canalisations spéciales pour la circulation du combustible et le transfert de la chaleur. L'un des problèmes les plus importants relatifs à la manipulation des solutions aqueuses de combustible réside dans le fait que l'eau lourde se décompose sous l'action des radiations. Comme le montre la figure 5, le mélange gazeux explosif de deutérium et d'oxygène ainsi formé doit être séparé du courant liquide, et on doit recombiner les gaz avant d'injecter de nouveau l'eau lourde dans le système. Les compresseurs indiqués servent à maintenir constant le volume et à éviter l'ébullition du liquide en circulation.

Caractéristiques thermiques d'une centrale nucléaire (groupe turbogénérateur)

Dans le programme expérimental relatif aux piles, on s'est jusqu'ici surtout préoccupé de rechercher des types de piles capables de fonctionner pendant longtemps aux températures élevées nécessaires pour produire de l'énergie avec un bon rendement. Les meilleurs résultats semblent devoir être obtenus par utilisation du sodium à des températures allant

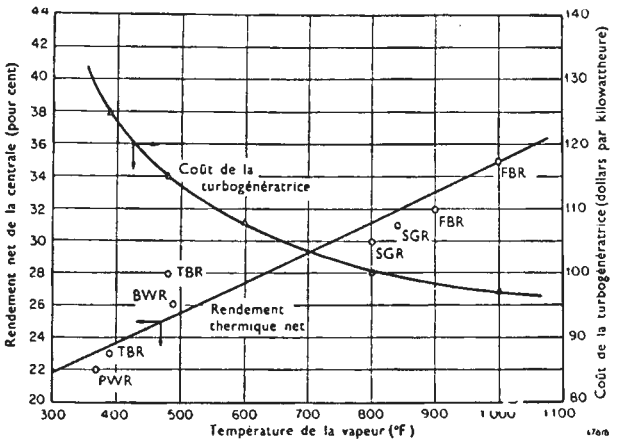


Figure 6. — Caractéristiques de la turbogénératrice à vapeur des centrales nucléaires.

de 900 °F à 1 100 °F (480 °C à 600 °C) et à des pressions absolues d'environ 100 livres par pouce carré (7 kg/cm²), ou de l'eau à des températures allant de 540 °F à 630 °F (270 °C à 320 °C) sous des pressions absolues atteignant jusqu'à 2 000 livres par pouce carré (140 kg/cm²). Les températures de vapeur qui en résultent, et qui sont indiquées sur la figure 6, vont de 400 °F à 1 000 °F (200 °C à 540 °C). Bien que le rendement thermique net de la récupération d'énergie varie énormément dans une telle gamme de température, ce qu'indique également la figure 6, le montant des capitaux investis dans cette partie de la centrale ne varie pas autant. Dans le cas des piles refroidies à l'eau, on remarque que le prix du groupe turbogénérateur varie de 115 à 125 dollars par kilowatt, et que pour les piles refroidies au sodium ce prix est de 97 à 100 dollars par kilowatt. Cet aspect de l'économie des centrales nucléaires signifie que la différence des prix de revient de l'énergie dans divers types de centrales nucléaires et dans les centrales classiques provient avant tout des prix de construction et des frais d'exploitation de la partie où est engendrée l'énergie thermique, c'est-à-dire de la pile, plutôt que de ceux du groupe turbogénérateur. Il suffit donc habituellement, pour comparer les prix de l'énergie, de supposer tout simplement que ceux du groupe turbogénérateur correspondront aux valeurs indiquées sur la figure 6, selon la température de la vapeur dans la centrale nucléaire dont il s'agit.

EXAMEN DES ESTIMATIONS CONCERNANT LES INVESTISSEMENTS

Toutes les données actuelles relatives au prix de l'énergie électrique que l'on pourra produire dans les centrales électronucléaires de grande puissance, dérivent de considérations théoriques. Elles représentent tout au plus l'opinion réfléchie de ceux qui sont le mieux au fait des divers facteurs techniques et économiques en jeu. On peut montrer [3, 4] que, dans la plupart des cas, les estimations du prix de revient de l'énergie sont beaucoup plus affectées par les diverses hypothèses non techniques que l'on a dû admettre, par exemple l'amortissement des centrales, les frais d'installation et le taux d'utilisation, que par des facteurs en rapport avec la technologie des piles. Comme le choix des hypothèses non techniques reflète le degré d'optimisme ou de pessimisme de ceux qui les ont faites, on peut dire que les estimations de prix n'ont, du point de vue pratique, aucune signification. Cependant, le fait que les optimistes l'emportent sur les pessimistes, et que la plupart des estimations indiquent des perspectives favorables quant à l'obtention d'une énergie nucléaire pouvant affronter la concurrence, est par lui-même des plus encourageant. En fait, la plupart des gens posent la question : « *Quand* aurons-nous de l'énergie nucléaire susceptible d'affronter la concurrence ? » au lieu de demander : « *Aurons-nous* un jour de l'énergie nucléaire susceptible d'affronter la concurrence ? » Les prévisions d'investissements pour diverses centrales électronucléaires de grande puissance, citées dans la bibliographie [5, 6] et résumées dans le tableau 3, varient de 183 à 450 dollars par kilowatt. (Il est à noter que certaines de ces estimations correspondent à des propositions fermes relatives à des centrales effectivement projetées.) Les estimations de prix de revient correspondantes vont, comme on le verra plus loin, de 4 à 10 millièmes de dollar par kilowattheure.

PRÉVISIONS RELATIVES A L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE QUI SERA SUSCEPTIBLE D'AFFRONTER LA CONCURRENCE

Certains membres de la Commission de l'énergie atomique ont évalué, pour l'année 1975, les besoins en énergie produite dans des centrales à vapeur, en fonction du prix de cette énergie [7]. Les résultats (voir le tableau 4) permettent d'estimer dans quelle mesure il faudra augmenter la capacité de production de vapeur entre 1955 et 1975. Ce tableau indique également les puissances correspondantes en mégawatts, et l'estimation des investissements totaux. D'après ceci, les possibilités économiques des centrales électronucléaires qui produisent de l'énergie à 10 millièmes de dollar par kilowattheure seraient de 300 millions de dollars jusqu'en 1975; elles s'élèveraient à 3 800 millions de dollars pour les prix supérieurs à 7 millièmes de dollar par kilowattheure, et à 25 000 millions de dollars pour les prix de 4 millièmes de dollar par kilowattheure. Il est donc important de déterminer les conditions que les centrales nucléaires devraient remplir pour produire de l'énergie à de tels prix de revient. Ici, le principal problème ne consiste pas à déterminer *combien* coûtera la centrale nucléaire, mais à estimer *a*) combien de temps elle durera, *b*) quels seront les frais d'exploitation et d'entretien, et *c*) quelles seront les dépenses nettes en combustible, obtenues en ajoutant les dépenses afférentes au stock initial

Tableau 3

Estimation du coût en capital des centrales électronucléaires

Type de pile	Compagnie ou groupe d'étude	Puissance électrique (en MW)	Frais d'investissement [a] (en dollars par kilowatt)
Eau lourde comme ralentisseur et réfrigérant	Commonwealth Edison (Nuclear Power Group)	234	352
Eau comme ralentisseur et réfrigérant . . .	Commonwealth Edison (Nuclear Power Group)	273	236
Eau lourde comme ralentisseur et eau comme réfrigérant	Bechtel, PG & E	101	365
Eau comme ralentisseur et réfrigérant . . .	Fluor Corporation	200	183
Graphite comme ralentisseur et eau comme réfrigérant	General Electric	700	249
Eau comme ralentisseur et réfrigérant . . .	Yankee Atomic Electric	100	240 [b]
Eau comme ralentisseur	Consolidated Edison	236	233 [b]
A eau bouillante	General Electric	300	226
A eau bouillante	Nuclear Power Group	180	250 [b]
Au sodium et au graphite	Monsanto	150	291
Au sodium et au graphite	North American Aviation	150	243
Au sodium et au graphite	Consumers Public Power District of Nebraska	75	323 [b]
Autorégénératrice à neutrons rapides	California Research and Development	173	269
Autorégénératrice à neutrons rapides	Detroit Edison	100	450 [b]
Homogène à solution aqueuse	Foster Wheeler-Pioneer Service	100	256
Homogène à solution aqueuse	Nuclear Power Group	180	240

[a] Non compris le coût du stock initial de la pile et des usines de transformation.
[b] Génératrices nucléaires de démonstration — 1955.

de combustible, à la consommation et à la transformation du combustible, et en soustrayant la valeur des nouveaux produits fissiles engendrés dans la pile. Comme on ne possède actuellement aucune expérience réelle de l'exploitation des génératrices nucléaires de grande puissance, la plupart des estimations relatives aux prix de revient de l'énergie électrique d'origine nucléaire sont influencées par le degré d'optimisme avec lequel on a fixé la durée d'amortissement de la pile, le taux d'utilisation et les frais d'exploitation et d'entretien. On s'en rendra bien compte dans les paragraphes suivants où l'on a

Tableau 4

Augmentation prévue de la puissance installée sur le réseau d'énergie électrique des États-Unis [a]

Prix de revient de l'énergie (en millièmes de dollar par kWh)	Pourcentage cumulatif du total	10^9 kWh	Puissance (en mégawatts) à un taux d'utilisation de 60 pour cent	Investissements cumulatifs (en millions de dollars)
10	1	9	1 700	300
8	4	36	6 800	1 200
7	14	118	22 000	3 800
6	39	340	65 000	11 000
5	67	580	110 000	19 000
4	85	740	140 000	25 000
3	98	855	163 000	28 000
2	100	874	166 000	29 000

[a] Excepté les centrales à combustion interne pour la période de 1955 à 1975.

Tableau 5

Dépenses nettes en combustible nécessaires à l'obtention d'une énergie nucléaire pouvant affronter la concurrence

	Dollars/kW	Millièmes de dollar/kWh	Dollars/kW	Millièmes de dollar/kWh	Dollars/kW	Millièmes de dollar/kWh
Piles refroidies à l'eau						
Génération de la vapeur (pile)	60	1,1	95	2,0	130	3,2
Groupe turbogénérateur	120	2,3	130	2,8	150	3,7
Exploitation et entretien	—	0,5	—	1,0	—	1,2
Dépenses nettes en combustible (stock, plus frais de transformation, moins valeur des sous-produits)	—	0,10	—	1,2	—	1,9
TOTAL		4,0		7,0		10,0
Piles refroidies au sodium						
Génération de la vapeur (pile)	130	2,5	155	3,3	180	4,4
Groupe turbogénérateur	100	1,9	105	2,2	110	2,7
Exploitation et entretien	—	0,5	—	1,0	—	1,2
Dépenses nettes en combustible (stock, plus frais de transformation, moins valeur des sous-produits)	—	— 0,9	—	+ 0,5	—	1,7
TOTAL		4,0		7,0		10,0

défini les conditions et les hypothèses correspondant à des prix de revient de 4 millièmes, 7 millièmes et 10 millièmes de dollar par kilowattheure.

Énergie à 4 millièmes de dollar par kilowattheure

Pour obtenir un prix de revient de 4 millièmes de dollar par kilowattheure dans une centrale nucléaire, il sera nécessaire de réaliser des conditions d'exploitation extrêmement favorables, comme par exemple un taux d'utilisation de 90 pour cent, et des frais d'entretien aussi bas que 0,5 millième de dollar par kilowattheure. Dans ces conditions et pour les investissements les plus faibles prévus, soit 180 dollars par kilowatt installé, on doit arriver à des dépenses nettes en combustible, telles qu'on les a définies plus haut, de 0,10 millième de dollar par kilowattheure.

Énergie à 7 millièmes de dollar par kilowattheure

Avec des investissements moyens, et dans des conditions d'exploitation moins favorables (c'est-à-dire un taux d'utilisation de 80 pour cent, et des frais d'exploitation et d'entretien de 1 millième de dollar par kilowattheure), l'énergie nucléaire pourra revenir à environ 7 millièmes de dollar le kilowattheure, avec des dépenses nettes en combustible comprises entre 0,5 et 1,2 millième de dollar par kilowattheure.

Énergie à 10 millièmes de dollar par kilowattheure

On peut prévoir la production d'énergie électrique d'origine nucléaire au prix de 10 millièmes de dollar par kilowattheure, dans l'hypothèse relativement prudente de conditions d'exploitation d'environ 70 pour cent pour le taux d'utilisation, et de frais d'entretien allant jusqu'à 1,2 millième de dollar par kilowattheure. Pour des investissements estimés à 290 dollars par kilowatt, des dépenses nettes en combustible de 1,7 millième de dollar par kilowattheure devraient suffire. Le tableau 5 présente une analyse plus complète des investissements prévus et indique les dépenses nettes en combustible nécessaires pour l'obtention d'énergie économique avec les piles refroidies à l'eau (PWR, BWR et TBR), et les piles refroidies au sodium (SGR et FBR), respectivement. On verra plus loin combien ces dépenses nettes en combustible sont voisines de la réalité.

COMBUSTIBLES NUCLÉAIRES

Bien que l'uranium-235 enrichi soit une source d'énergie considérable (20×10^6 kWh d'énergie thermique par kilogramme), ce n'est pas un combustible meilleur marché que le charbon; sa valeur oscille en effet entre 15 à 30 dollars le gramme. Comme l'aspect le plus intéressant de l'énergie d'origine nucléaire réside dans la possibilité d'obtenir cette énergie à des prix considérablement inférieurs à ceux que permet l'utilisation du charbon, toutes les centrales utilisant les combustibles nucléaires que l'on envisage pour la production industrielle d'énergie comportent des systèmes de régénération. De l'uranium-238 ou du thorium-232 sont alors placés dans le cœur de la pile, ou disposés tout autour

de ce cœur, et forment une couche dans laquelle, grâce à la capture de neutrons, un nouveau combustible nucléaire est engendré. L'importance de la capture dépend de la manière dont l'uranium ou le thorium fertile concurrencent les autres substances contenues dans la pile, déduction faite des pertes dues à la fuite des neutrons. Les efforts continus tendant à assurer une meilleure économie neutronique, c'est-à-dire une plus grande absorption des neutrons par l'élément fertile, constituent la partie la plus importante du programme de développement des applications civiles des piles, visant à produire de l'énergie à bon marché. Ce programme comprend le développement de la technologie de substances qui, comme le zirconium, sont susceptibles d'absorber les neutrons lents, l'utilisation de ralentisseurs spéciaux comme l'eau lourde et l'examen des problèmes particuliers que soulèvent les piles à neutrons rapides. Ces divers points seront traités dans d'autres mémoires. Dans la mesure où il ne s'agit que des facteurs économiques, il ne faut considérer l'économie neutronique que d'un point de vue général, par exemple d'après le taux de conversion du système. Ce taux est habituellement défini par le nombre d'atomes de combustible frais produit dans l'élément fertile par atome de combustible consumé; selon le type particulier de pile, il peut varier dans un très vaste domaine. Cependant, pour les piles que nous considérons, sa valeur maximum sera de l'ordre de 1 pour les piles autorégénératrices (PWR, BWR et SGR), de 1,2 pour la pile à solution aqueuse au thorium (TBR), et de 1,6 pour la pile autorégénératrice à neutrons rapides (FBR).

DÉPENSES EN COMBUSTIBLES DANS LES PILES AUTORÉGÉNÉRATRICES

On remarque, à la figure 7, que les piles autorégénératrices qui utilisent de l'uranium naturel ou légèrement enrichi sont étroitement associées à une usine de séparation d'isotopes, telle que l'usine de diffusion gazeuse. Ceci permet d'obtenir de l'uranium légèrement enrichi pour alimenter la pile (si nécessaire) et d'enrichir à nouveau le combustible épuisé. Dans ces piles, les dépenses en combustibles dépendent surtout du coût de l'uranium légèrement enrichi, de la durée d'irradiation, de la valeur de

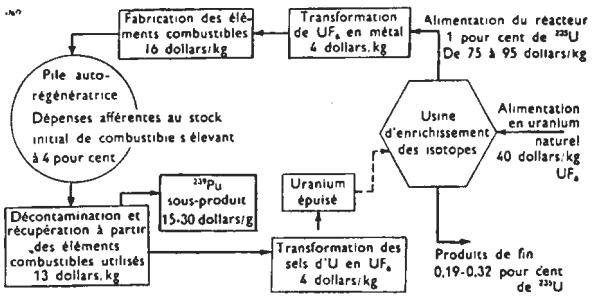


Figure 7. — Schéma de la distribution des matières dans les piles autorégénératrices (irradiation de 10 000 mégawatts-jour par tonne).

l'uranium épuisé que l'on envoie à l'usine d'isotopes, des divers prix de fabrication et de transformation chimique, et enfin de la valeur du plutonium présent dans le combustible épuisé. Si nous examinons ces facteurs l'un après l'autre, le premier problème qui se pose est celui du prix de l'uranium légèrement enrichi. Aucun renseignement officiel concernant ce prix n'a été révélé à ce jour. Il est cependant possible d'estimer la valeur de l'uranium légèrement enrichi par rapport à celle de l'uranium fortement enrichi, à partir des équations qui caractérisent le fonctionnement d'une usine idéale de séparation d'isotopes [8]. Dans ces équations, la valeur de l'uranium enrichi est donnée par la somme des deux prix suivants : celui de l'uranium naturel servant d'élément de base et celui du processus de séparation. Ce dernier est approximativement proportionnel à la quantité d'uranium à utiliser et à l'importance de l'usine nécessaire pour effectuer un enrichissement donné. Ainsi, le prix unitaire C du produit enrichi est donné par :

$$C = C_s S + C_F F$$

où C_s est le prix de revient du processus de séparation, en dollars par kilogramme; C_F le prix de l'uranium de base en dollars par kilogramme;

S le rapport : $\dfrac{\text{kilogramme de substance traitée}}{\text{kilogramme de produit}}$;

F le rapport : $\dfrac{\text{kilogramme d'uranium naturel}}{\text{kilogramme de produit}}$.

Le facteur S est donné par :

$$S = V(N_P) + W\,V(N_W) - F\,V(N_F)$$

où

W est le rapport : $\dfrac{\text{kilogramme de déchets d'uranium}}{\text{kilogramme de produit}}$;

$V(N)$ la fonction $(2N - 1)\,1n\,\dfrac{N}{1-N}$;

et N la concentration en uranium-235.

Sans entrer dans les détails, nous dirons qu'on peut combiner ces équations avec les équations d'équilibre des substances chimiques en jeu : $F = W + P$ et $F\,N_F = W\,N_W + P\,N_P$, et l'équation qui en résulte sert à calculer le prix de l'uranium légèrement enrichi par rapport à celui du produit fortement enrichi (90 pour cent d'uranium-235). La figure 8 indique les prix théoriques calculés de cette façon. On a admis que le prix de l'uranium-235 hautement enrichi serait respectivement de 15 et 30 dollars le gramme. Bien que les prix indiqués ici soient simplement des valeurs relatives établies par rapport au prix admis pour l'uranium enrichi, et qu'on doive par conséquent leur accorder le même degré de confiance qu'à ce dernier, ils n'en constituent pas moins une base fort utile pour comparer les dépenses en combustible dans les piles régénératrices utilisant divers taux d'enrichissement.

En ce qui concerne le coût des autres étapes du cycle de transformation, tel que le coût de à la conversion de l'uranium d'une forme dans une

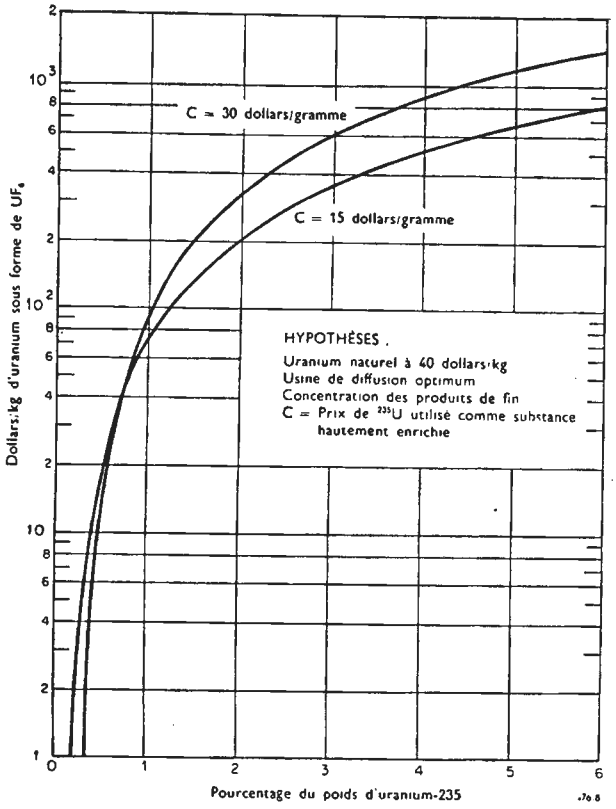


Figure 8. — Valeur de l'uranium légèrement enrichi.

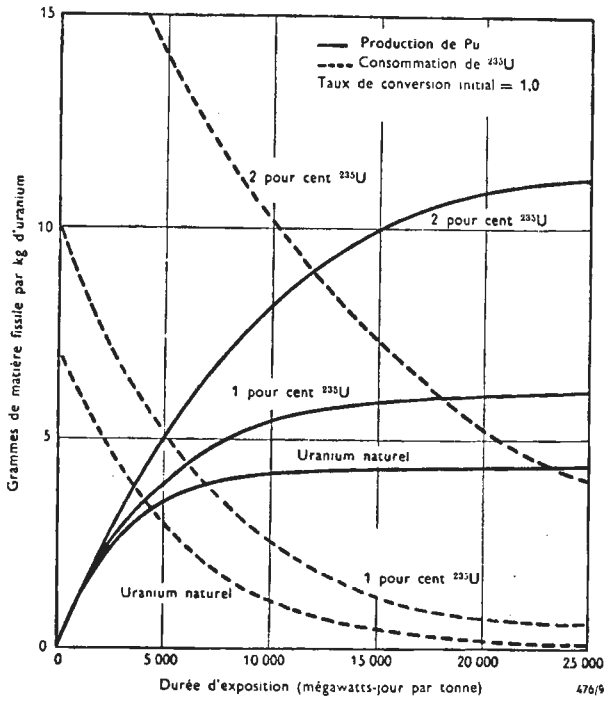


Figure 9. — Épuisement de ^{235}U et production de ^{239}Pu dans les piles autorégénératrices.

autre, la situation est également compliquée par le manque de données économiques sûres. Cependant, puisque de telles dépenses n'influent pas beaucoup sur le total des frais, on pourra arbitrairement admettre que les diverses étapes de la transformation chimique reviennent dans leur ensemble à environ 4 dollars par kilogramme, en se fondant sur l'expérience industrielle relative à des opérations semblables. Certains articles techniques mentionnent d'autres prix pour la transformation de l'uranium : 9 dollars par kilogramme pour l'usinage [9], 7 dollars par kilogramme pour le revêtement par une substance comme le zirconium, et 13 dollars par kilogramme pour la récupération et la décontamination [10]. On a estimé à 40 dollars par kilogramme le prix de revient de l'uranium métallique naturel. La quantité de plutonium présente dans le combustible épuisé, en négligeant les isotopes supérieurs, pourrait être en première approximation évaluée d'après les sections efficaces de l'uranium-238, de l'uranium-235 et du plutonium-239 pour les neutrons thermiques, ainsi que d'après le taux initial de conversion dans la pile. L'accroissement en plutonium-239 indiqué à la figure 9, a été calculé en fonction de la durée de l'irradiation, et est exprimé en mégawatts-jour de chaleur par tonne d'uranium (1 tonne = 910 kg), pour un taux de conversion égal à l'unité. L'épuisement de l'uranium-235 a été évalué de la même manière. On a négligé tous les isotopes supérieurs du plutonium et de l'uranium. La figure 9 peut servir à évaluer la plus-value correspondant au plutonium-239 que l'on obtient pour diverses durées d'irradiation et différents taux d'enrichissement.

Ces données, bien que grossières, peuvent permettre l'évaluation des dépenses nettes en combustible dans les piles autorégénératrices. Les résultats indiqués dans les tableaux 6 et 7 ont été calculés dans l'hypothèse que l'uranium-235 et le plutonium-239 hautement enrichis ont la même valeur et reviennent respectivement à 15 ou à 30 dollars le gramme. Les autres hypothèses sont : une irradiation de 10 000 mégawatts-jour par tonne, une dépense de 40 dollars par kilogramme d'uranium, un taux d'utilisation de 80 pour cent et une dépense de 4 pour cent pour le stock initial de combustible.

Effet de la durée d'exposition

Les dépenses en combustible indiquées dans les tableaux 6 et 7 ont été établies en supposant que la durée d'exposition était de 10 000 mégawatts-jour par tonne. Il est intéressant d'observer l'effet de la consommation sur les dépenses nettes en combustible. A cet effet, on a utilisé les mêmes prix de 15 et 30 dollars pour un gramme d'uranium-235, et on a admis la même valeur pour le plutonium-239 produit dans la pile et récupéré dans les éléments combustibles consommés. Les résultats indiqués à la figure 10 montrent que, dans les conditions que nous avons admises pour les piles alimentées en uranium contenant 2 pour cent de son poids en uranium-235, des durées d'exposition supérieures à 10 000 mégawatts-jour par tonne sont nécessaires

Tableau 6

Dépenses nettes en combustible dans les piles autorégénératrices

	Enrichissement en uranium-235 (en millièmes de dollar par kilowattheure)[a]		
	0,71 pour cent	1,0 pour cent	2,0 pour cent
Alimentation en uranium naturel	0,61	0,96	2,16
Enrichissement en isotope	0	0,18	1,06
Conversion de UF_6 en métal	0	0,07	0,07
Fabrication du combustible	0,13	0,13	0,13
Gainage du combustible	0,10	0,10	0,10
Combustible utilisé pour les transformations chimiques	0,20	0,20	0,20
	1,04	1,64	3,72
Dépenses afférentes au stock initial de combustible	0,13	0,21	0,53
	1,17	1,85	4,25
Valeur du plutonium-239	— 0,95	— 1,23	— 1,86
Valeur de l'uranium épuisé	0	0	— 1,10
Dépense nette en combustible	0,22	0,62	1,29

[a] Ces évaluations sont basées sur un prix de 15 dollars par gramme d'uranium-235.

Tableau 7

Dépenses nettes en combustible dans les piles autorégénératrices

	Enrichissement en uranium-235 (en millièmes de dollar par kilowattheure)[a]		
	0,71 pour cent	1,0 pour cent	2,0 pour cent
Alimentation en uranium naturel	0,61	1,08	2,68
Enrichissement en isotope	0	0,39	2,45
Conversion de UF_6 en métal	0	0,07	0,07
Fabrication du combustible	0,13	0,13	0,13
Gainage du combustible	0,10	0,10	0,10
Combustible utilisé pour les transformations chimiques	0,20	0,20	0,20
	1,04	1,97	5,63
Dépenses afférentes au stock initial de combustible	0,13	0,26	0,81
	1,17	2,23	6,44
Valeur du plutonium-239	— 1,87	— 2,46	— 3,70
Valeur de l'uranium épuisé	0	0	— 1,39
Dépense nette en combustible	- 0,70	- 0,23	1,35

[a] Ces évaluations sont basées sur un prix de 30 dollars par gramme.

pour obtenir des dépenses en combustible inférieures à 0,5 millième de dollar par kilowattheure. Si la teneur en uranium-235 n'est que de 1 pour cent, la durée d'exposition requise n'est que de 5 000 mégawatts-jour par tonne. Dans les installations alimentées en uranium naturel, on s'aperçoit que les

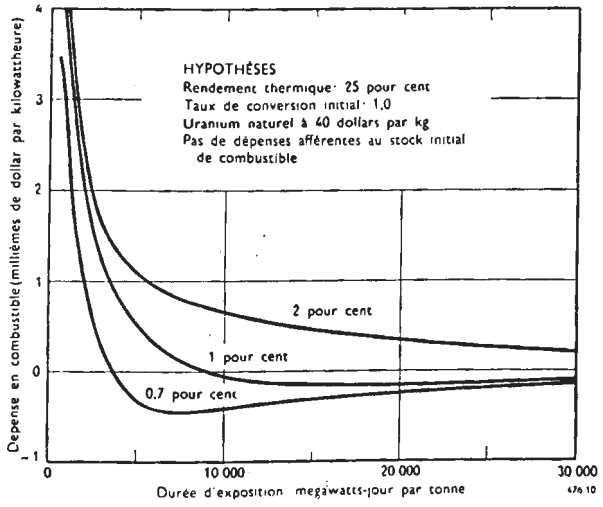


Figure 10. — Dépense en combustible dans les piles autorégénératrices.

dépenses en combustible commencent en fait à augmenter avec de longues irradiations. Ce phénomène provient de ce que le plutonium-239, aux prix admis de 15 et 30 dollars le gramme, présente une valeur légèrement supérieure à celle de l'uranium-235 dans l'uranium à 40 dollars le kilogramme, et de ce qu'avec une longue irradiation, la pile consomme trop de plutonium-239. Si le plutonium coûtait moins cher que l'uranium naturel, on aurait un moindre intérêt à le retirer et à le vendre.

On s'aperçoit ainsi qu'avec les piles autorégénératrices dont la durée d'exposition du combustible peut atteindre 10 000 mégawatts-jour par tonne, les dépenses nettes en combustible varieront de 0,7 à 1,4 millième de dollar par kilowattheure, selon le prix admis pour l'uranium hautement enrichi et pour le plutonium, et selon le degré d'enrichissement. Avec des piles autorégénératrices alimentées en uranium dont la teneur en uranium-235 est supérieure à 2 pour cent, il ne semble pas que les dépenses nettes en combustible puissent être inférieures à environ 1,3 millième de dollar par kilowattheure. D'autre part, avec les piles utilisant de l'uranium naturel, il serait peut-être possible d'obtenir des dépenses nettes en combustible allant de 0,7 à 0,2 millième de dollar par kilowattheure. Dans ce cas, il faudrait ajouter les dépenses afférentes au stock

initial d'eau lourde. Avec un taux d'évacuation de la chaleur d'environ 10 kW par litre, et un coût d'environ 28 dollars par livre anglaise (61 dollars par kilogramme), il faudrait ajouter pour l'eau lourde environ 0,35 millième de dollar par kilowattheure à la dépense en combustible d'une pile à uranium naturel refroidie et ralentie par l'eau lourde.

DÉPENSES EN COMBUSTIBLE DANS LES PILES AUTORÉGÉNÉRATRICES A NEUTRONS RAPIDES

Par définition, les piles autorégénératrices sont celles qui produisent autant, sinon plus, de combustible qu'elles n'en brûlent. Il n'y a donc dans ces piles aucune dépense due à la consommation de combustible; au contraire, il peut même y avoir une plus-value grâce au combustible produit. On peut soit mélanger le combustible et l'élément fertile, et les utiliser dans le cœur de la pile, soit concentrer le combustible dans le cœur en l'entourant d'élément fertile. Pour des raisons tenant à l'économie neutronique et à l'approvisionnement en combustible, la plupart des piles autorégénératrices à neutrons rapides envisagées seront réalisées selon la seconde méthode, bien qu'il soit souvent souhaitable d'avoir un peu d'uranium-238 dans le cœur de la pile aussi bien que dans la couche extérieure. Par exemple, une de ces piles utiliserait un mélange de 10 pour cent de plutonium-239 et de 90 pour cent d'uranium-238 dans le cœur, et un mélange d'environ 1 pour cent de plutonium-239 et 99 pour cent d'uranium-238 dans la couche extérieure. Cette dernière proportion est déterminée par l'équilibre entre les dépenses nécessaires pour la constitution de la couche et les dépenses qu'entraîne son traitement chimique.

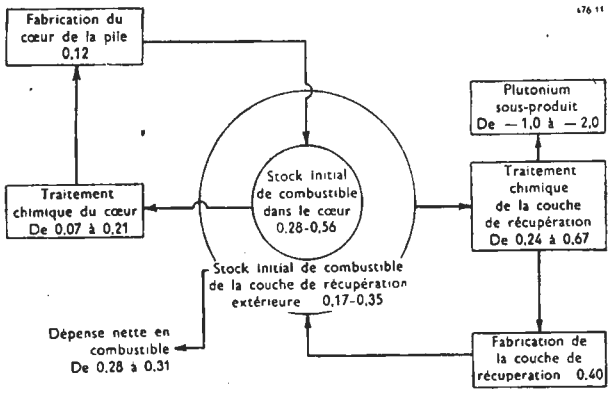


Figure 11. — Schéma de la distribution des matières dans les piles autorégénératrices à neutrons rapides.

N. B. — Les chiffres indiquent des coûts exprimés en millièmes de dollar par kilowattheure.

Sur la figure 11, sont indiquées les étapes des transformations qui ont lieu dans une pile autorégénératrice à neutrons rapides. On a évalué les dépenses afférentes au traitement d'après les données fournies par certains articles [9, 10], en fixant arbitrairement à 22 dollars par kilogramme les frais de fabrication des éléments du cœur de la pile, et à 11 dollars par kilogramme ceux des éléments de la couche de récupération, et en estimant à 20 pour cent la consommation par cycle du plutonium dans le cœur de la pile. Les frais d'approvisionnement ont été calculés d'après des taux de transfert de la chaleur de 100 kW par kilogramme d'uranium dans le noyau central, et de 15 kW par kilogramme d'uranium dans la couche de récupération, la valeur du plutonium-239 étant supposée du même ordre de grandeur que précédemment. La valeur du plutonium engendré comme sous-produit a été évaluée en utilisant les mêmes données, et en admettant un taux de conversion de 1,6 (gain de régénération = 0,6). Les deux prix différents indiqués pour l'énergie correspondent respectivement aux valeurs extrêmes des frais de récupération et de décontamination des éléments combustibles et des éléments de la couche de récupération qui sont respectivement de 37 et de 13 dollars par kilogramme d'uranium [10].

DÉPENSES EN COMBUSTIBLE DANS LES PILES AUTORÉGÉNÉRATRICES A SOLUTION AQUEUSE AU THORIUM

Comme dans le cas précédent, la plupart des projets de piles autorégénératrices homogènes à solution aqueuse au thorium prévoient un combustible enrichi dans le cœur de la pile, entouré d'une couche fertile. Dans certains types à grande puissance, le combustible du cœur de la pile consiste en une solution d'environ 3 grammes d'uranium-233 (sous forme de sulfate) par litre d'eau lourde, et la couche est constituée par une suspension de 1 000 grammes d'oxyde de thorium par litre d'eau lourde. On laisse la teneur en uranium-233 de la couche atteindre une valeur

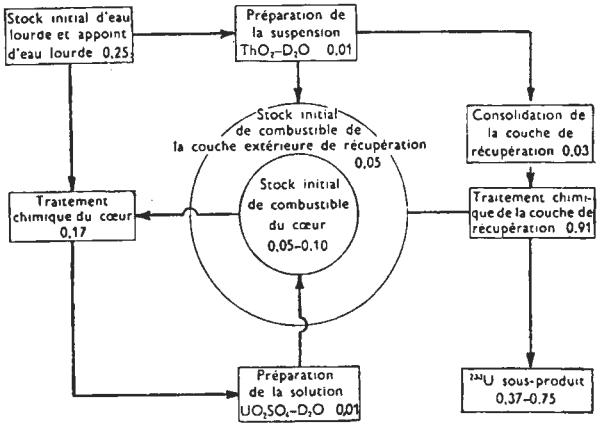


Figure 12. — Schéma de la distribution des matières dans les piles autorégénératrices homogènes au thorium.

N. B. — Les chiffres indiquent des coûts exprimés en millièmes de dollar par kilowattheure.

d'équilibre d'environ 3 grammes par litre avant de commencer la transformation et la récupération. L'uranium-233 est lui-même obtenu en alimentant initialement le cœur de la pile en uranium-235 enrichi.

Les étapes de la transformation qui a lieu dans la pile homogène comprennent l'enlèvement des produits de fission qui agissent comme des poisons indésirables sur les neutrons de la solution, la décontamination du thorium et la récupération de l'uranium-233 produit dans la couche fertile. Si l'on admet pour le traitement du thorium les mêmes valeurs que pour celui de l'uranium, c'est-à-dire 13 dollars par kilogramme, on obtient un prix d'environ 4 dollars par gramme d'uranium-233 obtenu. Les dépenses de traitement indiquées sur la figure 12 ont été calculées d'après ces données, la consommation en uranium-233 dans le cœur de la pile ayant été évaluée à 75 pour cent par cycle. Ce dernier chiffre a été déterminé par le rapport entre les frais afférents au traitement et les pertes de neutrons dues aux produits de fission toxiques.

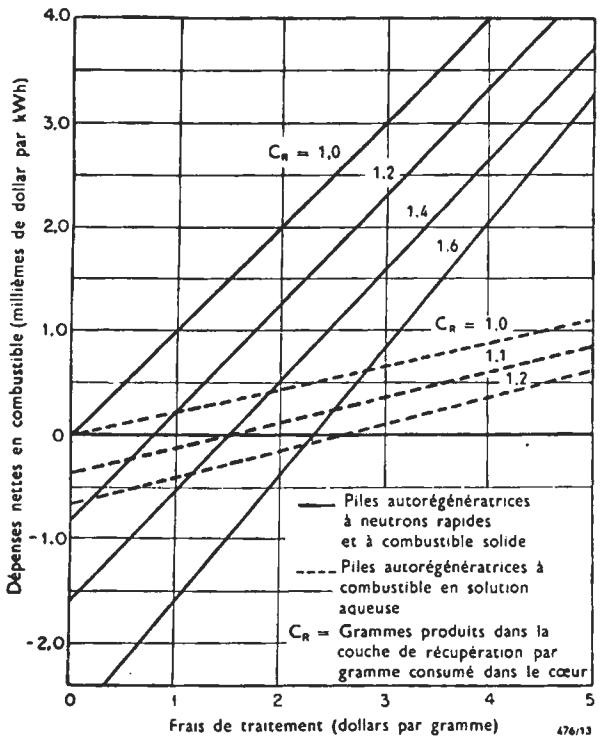


Figure 13. — Dépenses en combustible dans les piles autorégénératrices.

L'importance qu'il y a à ce que la consommation dans le cœur de la pile soit élevée est illustrée par la figure 13 qui donne les dépenses en combustibles, tant pour les piles à neutrons rapides que pour les piles homogènes, en fonction des frais afférents au traitement et du taux de conversion. La pente plus faible des caractéristiques des piles homogènes est due à ce que la consommation de ces piles a été estimée à 75 pour cent, alors qu'on a pris 20 pour cent pour les piles à neutrons rapides. Toutefois, le taux de conversion plus élevé de ces dernières tend à compenser ce désavantage.

PERSPECTIVES CONCERNANT L'OBTENTION D'ÉNERGIE NUCLÉAIRE A FAIBLE PRIX DE REVIENT

En admettant que le prix de l'uranium naturel sera égal à 40 dollars le kilogramme, et que la matière fissile produite dans la pile aura une valeur de 15 à 30 dollars le gramme, on peut dire qu'il y a de fortes possibilités d'obtenir de l'énergie électrique d'origine nucléaire à des prix d'environ 4 ou 5 millièmes de dollar par kilowattheures. On peut parvenir à ce résultat dans une centrale utilisant une pile à eau sous pression, alimentée en uranium naturel, refroidie et modérée à l'eau lourde. Une telle centrale ne reviendrait pas à plus de 200 dollars par kilowatt installé, compte non tenu du prix de l'eau lourde; elle devrait fonctionner avec un taux d'utilisation de 90 pour cent, en admettant 15 pour cent de frais fixes annuels pour la centrale et 4 pour cent pour les dépenses afférentes au stock initial de combustible. Les éléments combustibles devraient être soumis à une exposition de 5 000 à 6 000 mégawatts-jour par tonne.

On pourrait également obtenir de l'énergie à 5 millièmes de dollar, ou moins, avec une pile refroidie et modérée à l'eau ordinaire, et alimentée en combustible contenant 1 pour cent d'uranium-235. Avec des dépenses de première installation semblables à celles mentionnées ci-dessus, les expositions nécessaires seraient dans ce cas de l'ordre de 10 000 mégawatts-jour par tonne.

En ce qui concerne les piles autorégénératrices, on peut obtenir de l'énergie à 4 ou 5 millièmes de dollar par kilowattheure avec des dépenses de traitement s'élevant à 1 dollar par gramme, ou moins encore. Dans ces conditions, le prix d'une centrale équipée d'une pile autorégénératrice à neutrons rapides, avec un taux de conversion de 1,6, pourrait atteindre 270 dollars par kilowatt avec un taux d'utilisation de 90 pour cent. Avec des frais de traitement du même ordre, mais un taux de conversion de 1,15, une centrale à pile homogène à solution aqueuse reviendrait à 200 dollars, ou moins, par kilowatt installé et fournirait ainsi de l'énergie coûtant moins de 5 millièmes de dollar par kilowattheure.

Pour une pile autorégénératrice refroidie au sodium et modérée au graphite, on ne peut actuellement faire aucune hypothèse sur les dépenses en combustible et les investissements à effectuer qui conduise à un prix de revient de l'énergie électrique inférieur à 5 millièmes de dollar par kilowattheure. Toutefois, une telle pile semble tout à fait capable de fournir de l'énergie à un prix de 6 à 7 millièmes de dollar par kilowattheure. Les conditions requises seraient alors remplies par une centrale revenant à 240 dollars par kilowatt installé, alimentée en

uranium enrichi à 2 pour cent avec une exposition de 10 000 mégawatts-jour par tonne.

Sans chercher à approfondir davantage la valeur de toutes les informations économiques et techniques que l'on peut se procurer, il est bien certain que les perspectives d'utilisation industrielle de l'énergie nucléaire aux États-Unis d'Amérique sont pleines de promesses. Si, en outre, on peut obtenir dans la réalité les prix prévus pour les centrales nucléaires, et réaliser des conditions d'exploitation telles qu'une longue durée de vie des installations, un facteur de charge élevé et une utilisation efficace du combustible, ces centrales produiront de l'énergie électrique à des prix très inférieurs à la moyenne de ceux obtenus avec des combustibles classiques. Tout porte à croire que ces hypothèses seront réalisées d'ici cinq à dix ans, grâce à l'exécution, déjà commencée, d'un programme dynamique de développement des piles et de construction de centrales électronucléaires.

BIBLIOGRAPHIE

1. *Major Activities in the Atomic Energy Program, janvier-juillet 1954* (16e Rapport semestriel de la Commission de l'énergie atomique des États-Unis), U. S. Government Printing Office.
2. Lane, J. A., *Growth Potential of U. S. Nuclear Power Industry*, Nucleonics, 1954, *12*, nº 6, 12-17.
3. Lane, J. A., *Reducing Nuclear Power Costs*, Nucleonics, 1955, *13*, nº 1, 24-27.
4. Stern, T., *Appraisal of Reactor Systems for Central Station Power Plants*, Chemical Engineering Progress Symposium Series, 1954, nº 11, Part I, 177-182.
5. *Nuclear Power Feasibility Studies*, Nucleonics, 1953, *11*, nº 6, 49-62.
6. *National Industrial Conference Board Third Annual Conference — Atomic Energy in Industry*, octobre 1954.
7. *Power Costs : Nuclear vs Coal*, Nucleonics, 1954, *12*, nº 8, 50-51.
8. Cohen, K., *Theory of Isotope Separation*, National Nuclear Energy Series, vol. III, 1B.
9. Untermeyer, S., *An Engineering Appraisal of Atomic Power Costs*, National Industrial Conference Board Third Annual Conference, 1954.
10. Ohlgren, H. A., Lewis, J. C. et Weech, M., *Reprocessing Reactor Fuels*, Nucleonics, 1955, *13*, nº 3, 18-21.

Prix de revient de l'énergie et valeur marchande du plutonium provenant des premières centrales nucléaires

par J. A. Jukes *

Le coût de l'électricité produite au moyen de l'énergie nucléaire dépend d'un grand nombre de facteurs techniques et économiques. Ceux-ci comprennent : *a*) les dépenses d'investissement et la durée d'existence de l'installation nucléaire et de l'installation électrique, par kilowatt installé; *b*) le coût de la préparation du combustible avant et après irradiation; *c*) le débit de chaleur par kilogramme de substance fissile; *d*) le pourcentage de substance fissile consommée avant qu'un traitement soit nécessaire; *e*) le facteur de conversion de la pile, c'est-à-dire la quantité de substance fissile produite pour chaque gramme consommé; *f*) le rendement thermique de l'installation électrique; *g*) le taux d'intérêt et les frais généraux de fonctionnement; *h*) le facteur d'utilisation de l'installation électrique; *i*) les primes d'assurance; et enfin, *j*) le prix de l'uranium; *k*) le prix du plutonium.

Certains de ces facteurs sont étudiés en détail dans d'autres mémoires. La plupart d'entre eux sont difficiles à déterminer de telle sorte que l'ensemble des résultats est sujet à une grande marge d'erreur. D'ailleurs, les piles dont nous voulons établir le coût produiraient au moins dix fois plus d'énergie que n'importe laquelle des piles actuellement en service dans le monde. Dans la présente communication, je n'essaierai pas d'anticiper sur les mémoires qui vont suivre en donnant une justification détaillée des divers postulats d'ordre technique.

Mon intention est d'aborder le problème d'un point de vue pratique. Au mois de février de cette année, le Gouvernement du Royaume-Uni a publié un programme relatif à la construction de centrales nucléaires. Le *Livre Blanc* [1]** qui donnait les grandes lignes de ce programme, contenait des évaluations du prix de revient de l'énergie provenant de ces centrales. Le but de la présente communication est d'indiquer de façon plus détaillée sur quelles bases sont fondées ces évaluations et, en particulier, d'examiner la question économiquement importante de la valeur du plutonium produit par les premières centrales.

DÉPENSES D'INVESTISSEMENT

Une centrale du type proposé pour les premières étapes du programme, mais destinée à produire aussi bien des substances fissiles utilisables à des fins militaires que de l'électricité, est déjà en construction à Calder Hall, en Angleterre. Elle est maintenant presque terminée et coûtera environ 16,5 millions de livres sterling. Elle comprend deux piles à refroidissement par gaz et à ralentisseur en graphite qui coûtent ensemble près de 7 millions de livres. La puissance fournie a été officiellement évaluée à « au moins 50 mégawatts ». On a ainsi un bon point de départ pour estimer le coût de construction des centrales de puissance supérieure actuellement proposées.

Comme la centrale de Calder Hall n'est pas construite uniquement en vue de la production d'énergie, on ne l'a pas dotée du maximum de puissance qu'elle aurait pu fournir. On sait que certaines modifications au projet, qui n'auraient pas grandement majoré les dépenses d'investissement, auraient augmenté la puissance électrique fournie de 50 pour cent. En dehors de ces transformations importantes, l'expérience acquise dans la mise au point de la centrale de Calder Hall a montré que certains perfectionnements de moindre importance pourraient aisément doubler cette puissance déjà notablement plus élevée. Il n'est donc pas impossible que les centrales dont les projets sont à l'étude fournissent une puissance voisine de 200 mégawatts. Mais je propose d'être prudent, comme je le serai pour tous les chiffres donnés dans la présente communication, et je me baserai seulement sur 150 mégawatts. Cela laisse une large marge pour de nouveaux progrès techniques.

Les évaluations de dépenses relatives à l'établissement des premières centrales calculées sur ces bases, sont données au tableau 1. Les dépenses d'investissement sont du même ordre que celles de Calder Hall, mais un peu plus élevées, particulièrement en ce qui concerne la partie non nucléaire de l'équipement, en raison de la plus grande puissance fournie. Le coût du premier chargement en combustible est quelque peu arbitraire; ceci est dû aux

---

Original : anglais.

* United Kingdom Atomic Energy Authority, Londres.

** Les numéros entre crochets renvoient à la bibliographie qui figure à la fin du mémoire.

Tableau 1

Prix de revient des centrales nucléaires à refroidissement au gaz et à ralentisseur en graphite (150 MW de puissance installée)

	Dépenses d'investissement (millions de livres sterling)		Dépenses annuelles (millions de livres sterling)		Prix de revient pour un taux d'utilisation de 80 pour cent (penny par kWh)
Investissements et frais de premier établissement					
Piles	7,5		0,68		
Autres installations	11,3		0,69		
Total pour la construction		18,8		1,37	
Coût du premier chargement en combustible à raison de 20 000 livres sterling par tonne d'uranium		5,0		0,20	
Total des dépenses d'investissement		23,8		1,57	0,36
Frais d'exploitation					
Frais généraux d'exploitation			0,26		
Frais de remplacement des cartouches à 20 000 livres sterling par tonne d'uranium			1,46		
Total des dépenses d'exploitation				1,72	0,40
Coût total *brut*				3,33	0,76 (= 9 millièmes de dollar)

incertitudes sur le prix de l'uranium, mais une très grande partie de ce prix représente le coût de la purification et de la préparation de l'uranium, de sa transformation en cartouches et le coût de la faible quantité de matière d'enrichissement qui peut être nécessaire.

Aucune pile n'a fonctionné assez longtemps aux puissances envisagées pour que l'on puisse en déterminer exactement la durée effective d'existence utile, mais le coût annuel a été calculé sur une durée de 15 années, ce qui est considéré comme une estimation prudente. La durée du reste de l'équipement est établie d'après la durée normale escomptée pour un équipement du type considéré.

L'intérêt sur le stock de combustible a été compté à raison de 4 pour cent; c'est le taux d'intérêt des emprunts à longs terme des United Kingdom Electricity Authorities. Étant donné que, déduction faite du coût du plutonium, les dépenses d'exploitation seront faibles, ces premières centrales fonctionneront comme centrales de base. L'expérience du fonctionnement des piles refroidies au gaz et de l'équipement des installations énergétiques normales fait penser qu'elles pourraient supporter un taux d'utilisation d'au moins 80 pour cent. Ceci donne une valeur de 0,36 penny (0,42 millième de dollar) pour le coût des investissements par kilowattheure pour chacune des 15 années d'existence prévues.

Frais d'exploitation

Jusqu'ici, les estimations ont été faites sur une base assez solide. Elles sont plus difficiles en ce qui concerne les frais d'exploitation. Les frais afférents au lieu d'implantation peuvent être facilement estimés d'après les conditions de fonctionnement actuelles. Le coût annuel du remplacement des chargements en combustible dépendra directement de l'irradiation réalisée, c'est-à-dire de la quantité de combustible consommé avant que les cartouches aient été défournées. En outre, le coût de l'extraction du plutonium produit dépendra aussi de l'irradiation. Le degré d'irradiation est donc un facteur technique dominant. On a supposé une valeur moyenne de 3 000 mégawatts-jour par tonne. C'est un chiffre qui peut sûrement être atteint, bien que les techniques exactes nécessaires pour l'obtenir économiquement de manière régulière ne soient pas encore parfaitement mises au point. Il n'est pas aussi certain que les possibilités initiales des premières centrales atteindront ce niveau, mais seule l'expérience pourra apporter des renseignements précis. D'autres mémoires traitent des problèmes de métallurgie qui restent à résoudre pour obtenir une forte irradiation de manière simple et peu coûteuse.

Dans le prix des cartouches d'uranium intervient, pour une grande part, le prix de la préparation. Les coûts de préparation sont importants

aussi pour l'extraction du plutonium. Pour les premières piles, ces coûts sont inférieurs à la valeur estimée du plutonium obtenu. Celle-ci est examinée ci-dessous en détail. Mais, comme les dépenses d'investissement des piles s'abaissent et que la valeur du plutonium diminue, les coûts de préparation auront de plus en plus d'importance. Il y a de bonnes raisons de penser que ces coûts descendront finalement bien au-dessous des valeurs qui découlent des indications données; mais ces valeurs correspondent à des estimations prudentes et montrent ce qu'il est raisonnable d'attendre des premiers types de piles.

Coût de l'électricité, compte tenu de la vente du plutonium et de son réemploi

Il résulte de ces hypothèses que le prix brut de l'électricité provenant des premières centrales peut être estimé à 0,76 penny par kilowattheure (9 millièmes de dollar). Ce coût brut ne tient pas compte de la vente ou de l'utilisation du plutonium produit. C'est celui qu'il faudrait retenir si les cartouches irradiées étaient mises au rebut.

Le coût de l'électricité provenant d'une centrale thermique nouvelle brûlant du charbon et qui fonctionnerait aussi avec un taux d'utilisation élevé, est estimé au Royaume-Uni à 0,60 penny par kilowattheure. On peut se demander si les recettes provenant de la vente du plutonium seront suffisantes pour compenser cette différence. Nous examinons cette question dans la deuxième partie de la présente communication. La conclusion à laquelle nous sommes parvenus est que la valeur intrinsèque de ce métal est au moins suffisante, de telle sorte que le coût de l'énergie fournie par ces premières centrales doit être égal ou inférieur à celui de l'énergie des centrales classiques modernes.

Si ces premières centrales nucléaires étaient absolument incapables de vendre leur plutonium, qui est un sous-produit, à un prix quelconque, le prix de l'électricité qu'elles produiront ne serait pas le coût brut donné ci-dessus, puisque les cartouches ne seraient pas mises au rebut. Le plutonium serait utilisé à nouveau — il serait extrait, façonné en cartouches de combustible convenables et alimenterait de nouveau la pile. Cela conduirait à une économie sur l'alimentation en uranium naturel. La détermination exacte du coût de l'électricité serait compliquée dans ces conditions, car elle dépend de divers facteurs d'ordre technique : forme exacte sous laquelle le plutonium est de nouveau utilisé, problèmes associés aux caractéristiques nucléaires du plutonium et au taux de combustion qui pourrait être obtenu. Sur la base de ces facteurs, on peut raisonnablement estimer, au jugé, que le coût net serait d'environ 0,65 penny par kilowattheure, soit guère plus que le coût de l'électricité provenant des centrales ordinaires. C'est d'ailleurs probablement une estimation raisonnable, même pour les premières centrales.

Ce résultat est rassurant : on a de bons arguments pour penser que les recettes provenant de la vente du plutonium seront très élevées pendant une période limitée, mais, comme il ne peut exister de marché libre pour ce métal, les recettes envisagées sont forcément quelque peu arbitraires. Lorsqu'on utilise des données arbitraires de grande valeur, on laisse l'impression gênante qu'elles ont pu être choisies pour obtenir la réponse désirée. La suite du présent rapport a pour but de dissiper cette impression, mais même si celle-ci subsistait, il ne faut pas oublier qu'il reste toujours la possibilité de réemployer le plutonium.

Avant d'aborder cette question, délicate du point de vue économique, de la valeur du plutonium sous-produit, il serait bon de souligner de nouveau le fait que les valeurs indiquées ci-dessus se réfèrent à un type de centrale que le Royaume-Uni à l'intention de mettre en construction dans un avenir immédiat et aux coûts actuels de préparation. Pour ces futures centrales, on aboutirait à de meilleurs résultats, peut-être meilleurs qu'on ne le pense, en établissant pour les coûts de traitement chimique concernant ces premières piles, une moyenne portant sur la durée totale de leur existence. Mais un facteur défavorable intervient pour les futures centrales : il est probable que le prix du plutonium diminuera avec le temps; les centrales futures tireront donc des recettes moindres, de leur plutonium sous-produit, ce qui compensera en partie les améliorations obtenues par ailleurs. Mais il n'en est pas de même du coût de l'électricité dans le cas du réemploi, car ce prix de revient est indépendant du prix de vente du plutonium.

PRIX DU PLUTONIUM

Selon un principe général d'économie, il n'est possible d'obtenir la meilleure répartition des ressources et la production la plus économique qu'en attribuant des valeurs convenables aux différents facteurs entrée-sortie d'un procédé quelconque de production. L'importance de la valeur du plutonium produit ressort de façon évidente des chiffres indiqués ci-dessus. En outre, le plutonium produit dans les premières piles constitue le principal approvisionnement des piles suivantes, et son prix de vente détermine la valeur économique des deux types de piles. Si nous n'estimons pas le prix du plutonium à sa juste valeur, nous ne pouvons pas déterminer la façon la plus économique d'utiliser nos ressources et nous construirons probablement de mauvais types de piles ou nous ne les ferons pas fonctionner comme il se doit.

La question du prix du plutonium n'est donc pas une question théorique. Bien qu'en pratique le marché soit artificiel, nous devons essayer de déterminer ce que serait, sur un marché libre, le cours qui représenterait la valeur économique vraie. Une des difficultés majeures est que le prix cherché ne doit pas être simplement le prix véritable du

moment, mais le prix moyen des vingt prochaines années, c'est-à-dire pendant la durée de vie de la pile considérée.

La demande de plutonium dans le domaine civil

Le plutonium produit par une pile du type pile convertisseuse que nous venons d'examiner peut être utilisé de diverses manières : *a*) comme combustible dans une pile spéciale qui ne produirait pas elle-même de matière fissile (par exemple, en cas de fonctionnement en un lieu éloigné); *b*) par réemploi dans la pile qui l'a produit, d'où une certaine économie d'uranium naturel; *c*) comme premier chargement dans une pile autorégénératrice à neutrons rapides; *d*) comme premier chargement dans une pile à neutrons thermiques alimentée au thorium, qui deviendrait alors une pile à peu près auto-alimentée en matière fissile; *e*) comme moyen d'enrichir le premier chargement d'une pile à neutrons thermiques alimentée à l'uranium, pour laquelle un faible enrichissement est nécessaire. Dans ce cas, la production du plutonium serait encore plus élevée et une partie de ce plutonium pourrait être réemployée parallèlement à l'alimentation en uranium naturel, ce qui maintiendrait l'enrichissement voulu.

Pour que l'on recoure à l'une de ces utilisations, il faut que celle-ci soit rentable au prix courant du plutonium. Le cas le plus simple est *a*), où le plutonium est brûlé comme combustible sans aucune conversion et où, par suite, son prix a un effet direct considérable sur le prix de l'énergie produite. De telles piles simples ne seront probablement économiques que pour des prix relativement bas du plutonium; peut-être moins de 6 livres sterling par gramme, soit moins de la moitié du coût des hydrocarbures donnant la même quantité de chaleur. Il faudrait obtenir un plus bas prix à la calorie pour compenser les investissements plus élevés exigés par l'installation nucléaire.

Le réemploi, *b*), sera adopté seulement si l'économie d'uranium naturel qu'il permet de réaliser est supérieure aux recettes qu'autrement l'on pourrait retirer de la vente du plutonium. Le prix du plutonium au-dessous duquel le réemploi devient rentable dépend de ce fait du prix de l'uranium. L'uranium naturel contient seulement en matière fissile un cent quarantième de son poids. Un raisonnement simple donnerait à penser qu'une matière fissile pure, telle que le plutonium, ne vaut la peine d'être utilisée à la place de l'uranium naturel que si son prix est inférieur à 140 fois le prix de ce dernier. En pratique, la question est beaucoup plus complexe; le plutonium serait probablement utilisé en même temps que de l'uranium appauvri que l'on devrait pouvoir se procurer aisément; celui-ci contiendrait encore de l'uranium-235; les propriétés nucléaires du plutonium ne sont pas exactement les mêmes que celles de l'uranium-235 et les prix de fabrication des cartouches de combustible seraient très différents pour les deux substances. Compte tenu de ces facteurs, le prix d'achat du plutonium à partir duquel son utilisation est rentable ne dépasse probablement pas quelques livres sterling par gramme. A titre d'exemple, nous adopterons le chiffre de 3 livres sterling par gramme.

La possibilité de réemploi a aussi une autre conséquence importante; si nous admettons que le prix de l'uranium est fixé, le prix du plutonium ne peut pas descendre au-dessous de celui qui est admis pour le réemploi, soit environ 3 livres sterling par gramme. S'il tombait au-dessous de ce niveau toutes les piles existantes à neutrons thermiques l'utiliseraient en place d'uranium naturel et le plutonium serait demandé approximativement à ce prix. Il est vrai qu'en même temps, l'uranium naturel étant moins demandé, le prix de ce métal pourrait subir une baisse notable. Néanmoins, cet argument prouve qu'il y a, pour le plutonium, un prix minimum qui doit être voisin de ce chiffre, et qui est en rapport avec le prix de l'uranium.

Aussi bien dans le cas *c*), celui de la pile autorégénératrice à neutrons rapides, que dans le cas *d*), pile à neutrons thermiques alimentée au thorium, un grand investissement initial en matière fissile concentrée est nécessaire pour obtenir de grandes puissances, à moins que l'on ne puisse obtenir des rendements très élevés et des préparations rapides. Il faut raisonnablement s'attendre à obtenir environ un mégawatt sous forme de chaleur par kilogramme de matière fissile (excepté dans le cas de piles homogènes, où des rendements plus élevés devraient être possibles). Pour une centrale de grande puissance, plusieurs centaines de kilogrammes seraient nécessaires et il faudrait payer des intérêts élevés. La quantité de matière fissile ne diminuera pas, mais il faut prévoir un amortissement pour couvrir une baisse probable du prix de cette matière pendant la durée de vie de la pile. Actuellement, personne ne peut savoir exactement à quel prix de telles installations pourraient payer le plutonium qui leur est nécessaire tout en restant rentables mais, si la mise au point s'effectue avec succès et si des rendements de chaleur de cet ordre sont obtenus, elles pourront payer le gramme de plutonium de 6 à 12 livres sterling, ce qui augmenterait d'environ 0,05 penny par kilowattheure le prix de l'électricité fournie par une centrale de base.

Enfin, il reste la possibilité *e*) d'utiliser le plutonium pour enrichir légèrement l'uranium des piles à neutrons thermiques. Ici aussi, on n'aurait besoin que d'un premier chargement, car les chargements en combustible de remplacement se feraient en utilisant tout ou partie du plutonium produit dans la pile en même temps qu'une quantité convenable d'uranium naturel; c'est-à-dire que l'enrichissement pourrait être maintenu par réemploi d'une partie du plutonium. La quantité de plutonium nécessaire pour l'investissement initial serait moindre, par exemple de 100 à 200 kg. Les données économiques de ce type de pile à neutrons thermiques et à uranium enrichi sont donc moins étroitement liées au prix payé pour le premier

chargement en plutonium que celles des piles dont nous avons précédemment parlé. Économiquement parlant, la demande pour cet emploi est « non élastique ». Nous avons montré ci-dessus que l'électricité sera produite à raison d'environ 0,65 penny par kilowattheure par les centrales qui seront construites dans les années qui vont suivre, sans que leur plutonium ait d'autre fonction qu'interne (c'est-à-dire, où il sera seulement réemployé). Ce prix devrait diminuer rapidement dans les dix prochaines années. Il y a toutes chances pour que l'on mette au point des piles utilisant un combustible plus enrichi qui soient plus économiques que les premiers types de piles dont nous avons parlé ci-dessus. De telles piles seraient alors en mesure de payer au moins 12 livres sterling par gramme pour l'enrichissement, car cela grèverait seulement d'environ 0,02 penny par kWh le prix de l'électricité produite.

Il faut apporter une importante restriction aux arguments ci-dessus. Le prix auquel on achèterait le plutonium pour l'une quelconque des utilisations examinées ne pourrait excéder le prix en vigueur pour une quantité équivalente d'uranium-235 séparé, ou d'uranium convenablement enrichi en isotope 235 dans une installation de diffusion.

L'argumentation exposée ci-dessus est résumée au tableau 2. Il donne à la fois les valeurs probables des quantités de plutonium en cause et la date à laquelle les piles citées pourraient commencer à produire et à vendre.

Tableau 2

Grandeur probable de la demande en plutonium dans le domaine civil

Type de la demande	Plutonium nécessaire	Date d'une demande de grandeur notable	Prix d'achat probable (livre sterling par gramme)
a) But particulier	Toute quantité disponible pour l'utilisation comme combustible	1965	6
b) Réemploi	Toute quantité disponible pour l'utilisation comme combustible	1962	3
c) Pile autorégénératrice à neutrons rapides.	Environ 500 kg pour le premier chargement de chaque centrale (150 MW électriques)	1970	6-12
d) Pile hétérogène à neutrons thermiques alimentée au thorium.	Environ 500 kg pour le premier chargement de chaque centrale (150 MW électriques)	1965	6-12
e) Enrichissement du premier chargement de nouvelles piles à neutrons thermiques (mélangé à de l'uranium naturel).	100 à 200 kg pour le premier chargement de chaque centrale (150 MW électriques).	1965	12

NOTES. — 1) Les dates sont celles de la mise en service des centrales alimentant le réseau. — 2) Les piles des types *c*) et *e*) peuvent être utilisées pour assurer une production notable de plutonium.

Fourniture de plutonium à l'usage civil

L'exécution du programme de production d'énergie nucléaire, au Royaume-Uni, permettra de commencer à fournir du plutonium à l'usage civil en 1964 à raison de quelques centaines de kilogrammes par an. Le taux de production augmentera assez rapidement par la suite. Sans doute en sera-t-il de même dans les autres pays.

Jusqu'en 1965 environ, la demande civile de plutonium excédera l'offre. De nombreuses demandes à des fins expérimentales ou pour la réalisation de prototypes seront satisfaites par les installations construites à des fins militaires ou par l'emploi de l'uranium-235 provenant des installations de diffusion. Par exemple, la pile autorégénératrice expérimentale productrice d'énergie dont la construction est actuellement en cours au Royaume-Uni fonctionnera au début avec de l'uranium-235; le plutonium serait préférable, mais on ne peut s'en procurer assez pour la charger complètement. Donc, jusqu'en 1965, le plutonium doit avoir un prix voisin du prix de l'uranium-235 séparé.

Dans les années postérieures à 1965, un équilibre s'établira graduellement entre l'offre et la demande en plutonium. La question est de savoir à quel prix il s'établira. Théoriquement, l'interac-

tion des forces économiques tendra à former un système à peu près équilibré. Ce système pourrait englober des centrales produisant un net excédent de plutonium, d'autres, d'un type différent, ayant une consommation notable et quelques nouvelles centrales en construction qui auraient besoin de plutonium à titre de premier chargement. Le prix du plutonium sera alors déterminé par la valeur économique des différents types; on peut montrer facilement que le coût de l'électricité provenant de chaque type de centrale sera le même une fois le système équilibré et le prix du plutonium fixé à un taux unique. Si l'on produit du plutonium en excès, son prix diminuera et la construction des centrales pouvant l'utiliser sera encouragée jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit atteint. Rennie [2] a décrit en détail cette situation d'équilibre en se fondant sur certaines hypothèses, qui visaient seulement à mettre le principe général en lumière,

Un facteur supplémentaire, le prix de l'uranium, vient compliquer l'équilibre. La manière la plus rapide de produire du plutonium est de faire appel à des piles convertisseuses à neutrons thermiques qui utilisent de l'uranium naturel ou légèrement enrichi. Si l'on a besoin de grandes quantités de plutonium, on aura également besoin de grandes quantités d'uranium et son prix tendra à augmenter. Il y a donc une interdépendance entre le prix de l'uranium et celui du plutonium, qui affectera l'équilibre dont nous venons de parler.

Prix du plutonium pendant les 20 à 25 prochaines années

Les arguments exposés ci-dessus peuvent maintenant être rassemblés pour décrire l'évolution probable des événements pendant les 20 à 25 prochaines années et l'effet qu'ils auront sur le prix du plutonium. Pendant les 10 prochaines années, un grand nombre des demandes de plutonium à des fins civiles ne seront probablement pas satisfaites et certaines devront l'être en utilisant l'uranium-235 séparé. Le prix du plutonium sera donc fonction du coût d'obtention de l'uranium-235 séparé. Pendant les 10 années comprises entre 1965 et 1975, nous verrons certainement se développer rapidement la construction de centrales nucléaires industrielles rentables. Elles peuvent être de types divers. Au cours de cette période, les piles exigeant un faible enrichissement seront probablement rentables malgré le prix élevé du plutonium destiné à cet enrichissement. L'importante demande de plutonium pour cette utilisation soutiendra donc le prix de ce métal pour un certain nombre d'années.

Les piles pourront également produire rapidement du plutonium. Pour cela, elles utiliseront une grande quantité d'uranium naturel. Nous pouvons donc nous attendre, entre 1975 et 1985, à une augmentation de la demande d'uranium à des fins civiles associée à un accroissement des quantités de plutonium, fournies au secteur civil, sans qu'il y ait nécessairement de grandes variations dans le prix de l'uranium dont l'approvisionnement augmentera fortement aussi. La construction des autres types de génératrices nucléaires dont il a été parlé ci-dessus en sera encouragée, ainsi que l'emploi du thorium. Pendant une période limitée, le prix du plutonium tendra à rester modérément élevé, car le nombre des centrales nécessaires sera important et chacune d'elles exigera un premier gros chargement en plutonium. Finalement, la vitesse de croissance du système déclinant ou les disponibilités en plutonium augmentant, le prix diminuera encore davantage.

Enfin, nous arriverons à une sorte de position d'équilibre où le prix du plutonium sera déterminé par l'économie des piles des différents types qui consomment ou produisent ce métal, par le prix de l'uranium et par la vitesse du développement des ensembles énergétiques nucléaires à travers le monde. Le prix du plutonium sera alors bien inférieur aux prix élevés qui s'établiront pendant les 15 prochaines années, mais il est improbable qu'il tombe au-dessous de quelques livres sterling par gramme. A ce dernier prix, il serait réemployé dans les piles à neutrons thermiques ou brûlé directement sans convertir de matière fertile. La baisse du prix à cette valeur se produira probablement entre 1970 et 1980; il est peu probable, d'après ce que nous pouvons voir actuellement, qu'elle survienne bien avant 1970.

CONCLUSIONS

Ces évaluations du prix du plutonium sont plutôt des suppositions que le résultat d'une analyse scientifique; des développements techniques imprévus pourront faire s'élever ou baisser les prix; mais quelques estimations sont nécessaires si nous voulons établir le prix de l'énergie nucléaire et si nous voulons nous donner une jauge convenable pour mesurer les avantages économiques relatifs des différents types de piles et des différents procédés d'exploitation.

Nos hypothèses touchant l'évolution des prix donnent à penser qu'il serait raisonnable de s'attendre à un prix élevé pour le plutonium, voisin de 12 livres sterling par gramme, pendant la plus grande partie de la vie des piles qui seront construites ces années prochaines, mais, à la fin de la vie des piles qui seront construites ultérieurement, les prix seront certainement plus bas.

Les prix examinés ci-dessus représentent le prix de vente du plutonium pur. Pour calculer le prix du combustible irradié provenant des premières piles, il faut tenir compte du coût de l'extraction du plutonium provenant du combustible usé. Cette extraction peut coûter quelques livres sterling par gramme, coût qui diminuera certainement avec les progrès futurs. Par conséquent, une évaluation même prudente nous permettrait de supposer que la vente du plutonium des premières centrales conduirait à des recettes nettes de l'ordre de 5 à 10 livres sterling le gramme. La valeur la

Tableau 3

Prix de revient net de l'électricité produite par les premières piles refroidies au gaz et à ralentisseur en graphite

(150 MW de puissance nominale)

	Penny par kWh	Millièmes de dollar
Prix de revient brut avec un taux d'utilisation de 80 pour cent (d'après le tableau 1)	0,76	9
A déduire pour la vente de plutonium à 5 et à 10 livres sterling le gramme, net de frais de préparation	0,17 0,33	2 4
Prix de revient net de l'électricité	0,59 0,42	7 5
Prix de revient net de l'électricité produite par des centrales thermiques modernes utilisant le charbon	0,60	7

plus forte semble la plus raisonnable. Ces valeurs, appliquées aux premières centrales décrites au début de la présente communication, conduiraient à une réduction du coût de l'électricité de 0,17 penny par kWh et de 0,33 penny par kWh (de 2 à 4 millièmes de dollar).

Nos estimations prudentes nous ont permis de fixer à 0,76 penny par kWh (9 millièmes de dollar) le coût brut de l'électricité provenant des premières piles. Si nous tenons compte maintenant (voir tableau 3) des recettes prévues pour la vente du plutonium, nous obtenons une valeur comprise entre 0,59 penny par kWh (7 millièmes de dollar) et 0,42 penny par kWh (5 millièmes de dollar). Ce sont ces valeurs qui doivent être comparées avec le prix de revient de l'électricité produite par les centrales classiques modernes au Royaume-Uni, lequel est estimé à 0,60 penny par kWh. Nous considérons que ces valeurs justifient notre affirmation, selon laquelle le coût de l'énergie produite par nos toutes premières centrales industrielles sera vraisemblablement égal ou inférieur à celui des centrales classiques.

Remerciements

J'exprime ma gratitude à MM. J. M. Hill, J. C. C. Stewart et J. V. Dunworth, qui m'ont aidé à préparer ce mémoire.

BIBLIOGRAPHIE

1. *A Programme of Nuclear Power*, Cmd. 9389, H. M. Stationery Office, février 1955.
2. Rennie C. A., *Economic Power from Fast Reactors*, J. Nuclear Energy, 1954, vol. 1.

Importance, pour l'économie de l'énergie électronucléaire, des facteurs inhérents aux phases thermique et électrique du processus de production

par Joseph Bečvář* et Augustin Ševčík**

Lorsque l'on étudie les perspectives d'utilisation de l'énergie nucléaire dans le cadre de l'économie énergétique, il convient de prendre pour point de départ les données concrètes que nous possédons actuellement sur le coût des centrales électronucléaires — données qui, pour le moment, ne peuvent guère provenir que de l'étude des projets.

Puis il faut en inférer, pour une période de dix à vingt ans, le rythme probable d'expansion et de perfectionnement sur lequel on peut raisonnablement compter, étant donné les progrès réalisés dans la mise au point des centrales d'un autre genre.

Cela étant établi, un problème d'un intérêt considérable se pose pour les spécialistes de l'énergie thermique : dans quelle direction faudra-t-il s'orienter pour tenir compte de l'évolution relative aux paramètres du cycle thermodynamique (c'est-à-dire à la transformation de la chaleur dégagée en énergie électrique) ? Cette question est capitale, étant donné qu'avec les premiers projets de centrales électronucléaires, on semble faire un pas en arrière par rapport aux centrales thermoélectriques déjà existantes; par conséquent, si cette orientation des paramètres vers des valeurs plus basses se maintenait lors du développement des centrales nucléaires, les progrès de la technologie, en matière d'énergie thermique, risqueraient d'être freinés jusqu'à un certain point.

Le présent mémoire constitue un essai pour établir les perspectives de développement des centrales électronucléaires en ce qui concerne les paramètres du cycle de la vapeur et leur importance économique pour l'utilisation de l'énergie nucléaire.

Quant aux centrales électriques à vapeur, qui utilisent les combustibles classiques, voici en résumé quelle en a été l'évolution.

Une fois faites, dès le XVIIIe siècle, les premières tentatives pour construire des machines à vapeur, le progrès a été extrêmement lent. En effet, pour ne pas se laisser prendre de vitesse par la demande croissante d'équipement mécanique, il a fallu créer et développer des branches entières de science pure et appliquée. Ce processus s'est poursuivi jusque dans la deuxième moitié du XIXe siècle. Jusqu'à la fin de la première guerre mondiale, on construisit des machines à vapeur fonctionnant sous une pression de 12 à 18 atmosphères environ. Vers 1925, l'essor économique détermina un progrès considérable dans la technique de l'équipement pour la production d'énergie thermique. La pression supportée par les chaudières augmenta et atteignit 30 à 80 atmosphères. On trouvait çà et là des installations où la pression atteignait ou même dépassait 100 atmosphères. A partir de 1930, une pression de 90 atmosphères devint un phénomène courant. La deuxième guerre mondiale provoqua un temps d'arrêt dans cette progression. Ce n'est qu'après la guerre, grâce à un nouvel essor de la production d'énergie électrique, qu'on se mit à construire des installations utilisant des pressions de 130 à 160 atmosphères. Au cours des dernières années, une fois reconnus les avantages qu'il y avait à produire de la vapeur avec des paramètres hypercritiques, on se mit brusquement à augmenter les pressions qui, dans les premiers équipements industriels, dépassèrent 300 atmosphères.

En même temps que s'accroissaient les paramètres, on vit augmenter les dimensions des chaudières et des machines, depuis les chaudières minuscules et les turbines à vapeur de type individuel jusqu'aux gigantesques et complexes installations qui fonctionnent dans d'énormes réseaux d'énergie, et dont la puissance se mesure par centaines de mégawatts et par centaines de tonnes de vapeur par heure.

Cette évolution vers l'emploi de paramètres plus élevés a été surtout inspirée par le désir de diminuer les frais d'exploitation, notamment les frais de combustible; on admettait néanmoins un certain renchérissement de l'équipement, vu la nécessité d'employer des matériaux, des métaux notamment, de qualité supérieure et en plus grande quantité. Pour contrebalancer ce renchérissement, il a été possible de réduire la surface occupée ou l'espace bâti par unité de puissance. Du fait qu'il fallait

---

Original : russe.

* Professeur à l'Institut technique de Pilsen.

** Ingénieur et docteur ès sciences appliquées.

au début renforcer la sécurité, le coût de l'équipement a quelque peu augmenté. Puis, l'expérience aidant, on a pu diminuer certains coefficients de sécurité et perfectionner l'équipement en simplifiant sa construction et en abaissant encore le coût spécifique du combustible. En même temps, la métallurgie a produit à meilleur compte les matériaux indispensables, grâce à l'augmentation des quantités fabriquées; enfin, le perfectionnement des matériaux employés a entraîné une nouvelle baisse des frais.

Entre le coût des premiers équipements expérimentaux destinés à utiliser des paramètres dépassant les valeurs courantes et celui des appareils fabriqués en série, la différence est considérable. Pour couvrir le coût plus élevé des premiers, on a recours à diverses sources : ou bien les usines de construction mécanique, désireuses de s'assurer pour l'avenir un avantage sur leurs concurrents, livrent les équipements, même à perte, dans l'espoir que leurs ventes augmenteront par la suite; ou bien il s'agit d'opérations intégrées à un plan unifié de développement économique du pays, ce qui permet d'affecter des ressources financières à la création de nouvelles bases matérielles pour l'économie nationale.

Mais dans le cas de l'énergie atomique, si l'on établit une comparaison entre les centrales électronucléaires et les centrales existantes actionnées par les turbines à vapeur, on se trouve en face d'un progrès plus important, dans un domaine où l'expérience nous fait totalement défaut.

La production croissante d'énergie d'origine nucléaire nous met en présence d'une série de problèmes nouveaux : il faut assurer la protection des ouvriers et du milieu ambiant contre l'effet du rayonnement; la technologie de la production de cette énergie est complètement nouvelle; les matériaux de structure sont exposés non seulement aux efforts thermiques et dynamiques, mais aussi à un bombardement très violent, ainsi qu'à l'effet des rayonnements. Il s'ensuit que la première chose à faire pour avoir bien en main une situation si complexe sera, pendant la première étape, de laisser de côté les problèmes moins urgents. En résumé, nous emploierons de basses températures et, par suite, de faibles pressions dans la phase vapeur du cycle de transformation de l'énergie nucléaire en électricité. Les investissements en capitaux dans ces premières centrales électronucléaires seront considérables, en dépit du taux relativement faible du rendement énergétique d'un cycle de ce genre.

Il est impossible de comparer cette augmentation des frais (dépenses d'investissement) avec le renchérissement relatif d'une centrale électrique ordinaire où l'on emploie de nouveaux paramètres de vapeur dépassant le niveau courant; en effet, le « coefficient d'innovation », c'est-à-dire la relation entre les nouveaux éléments de structure et des éléments classiques bien éprouvés, est beaucoup plus élevé, ce qui fait que l'on s'écarte bien davantage des sentiers battus.

Aussi faut-il considérer comme purement spéculatives toutes les données actuelles concernant les dépenses en matériaux pour le cœur et pour les diverses parties de la pile, ainsi que les données relatives au volume et au coût de l'équipement. Si l'on veut comparer les perspectives de l'utilisation de l'énergie nucléaire et l'orientation suivie dans le développement de l'outillage pour la production d'énergie thermique, il faut s'appuyer sur une analyse minutieuse de toutes les conditions dans lesquelles s'opère la transformation de l'énergie nucléaire en électricité.

INFLUENCE DES PARAMÈTRES DU CYCLE DU TRAVAIL SUR LE TRANSFERT DE LA CHALEUR D'UNE PILE

En ce qui concerne les conditions du transfert de la chaleur d'une pile, on peut distinguer en principe les trois cas suivants :

1. Le combustible nucléaire reste dans la pile; la chaleur est transférée par le réfrigérant qui s'écoule en suivant les éléments thermogènes, sans changer de phase.

2. Le combustible nucléaire reste dans la pile; le transfert de la chaleur se fait à l'aide d'un liquide qui s'évapore dans la pile.

3. Le combustible nucléaire, mélangé à d'autres éléments, traverse la pile et transmet la chaleur qui s'y est dégagée au corps intermédiaire ou au réfrigérant en dehors de la pile.

Nous examinerons d'abord le premier cas, où les réalisations sont les plus avancées.

Le combustible nucléaire reste dans la pile (en général à la phase solide; il s'agit de barres pour une pile hétérogène) et la chaleur est transférée par le réfrigérant (gaz, eau sous pression, métal en fusion) qui s'écoule en suivant les éléments thermogènes.

Pour un calcul détaillé, il faudrait tenir compte de la répartition de la chaleur émise à l'intérieur de la pile (qui dépend de la distribution du flux de neutrons) selon sa section transversale et longitudinale. Mais, pour notre étude, on peut se contenter de tenir compte du seul ensemble actif. La répartition de la chaleur dégagée sur les différents éléments de la section transversale de la pile peut varier, de même que le transfert de la chaleur à partir de ces différents éléments peut se réaliser de diverses manières. Cependant, dans les deux cas, les principes d'analogie avec le rendement total de la pile s'appliquent aux éléments pris séparément, c'est-à-dire aussi à l'élément dans lequel on atteint une certaine valeur limite.

La chaleur extraite par le réfrigérant dans un élément :

$$Q_1 = \bar{\beta} G_1 (t_2 - t_1) \qquad (1)$$

est égale à la chaleur amenée par transfert à partir des éléments thermogènes :

$$Q_1 = \bar{\alpha} F_1 \Delta t \qquad (2)$$

où F tient compte aussi de l'effet du transfert indirect par le ralentisseur, etc.

La température maximum dans l'élément thermogène est :

$$t_{2f}\,max = t_2 + \Delta t \qquad (3)$$

En prenant m différent de l'unité, on tient compte de la distribution du flux de neutrons et par cela même du dégagement de la chaleur suivant les éléments thermogènes. Pour le raisonnement ultérieur, nous pourrons corriger comme il convient le coefficient $\bar{\alpha}$.

En nous servant des équations (*1*), (*2*), (*3*), nous obtenons la relation suivante :

$$t_{2f}\,max = t_1 + Q_1\left(\frac{1}{\bar{\beta}G_1} + \frac{1}{\bar{\alpha}F}\right), \bar{\alpha} = \bar{\alpha} \quad \text{m} \qquad (4)$$

$$Q = kQ_1,\ G = nG_1 \qquad (4a)$$

Ces relations peuvent être représentées sous forme de diagrammes qui différeront entre eux suivant les grandeurs considérées comme constantes.

Le facteur limite pour les piles hétérogènes, c'est la température maximum des éléments thermogènes, sous réserve de ne pas dépasser la température du changement de phase de l'uranium $\alpha - \beta$; ainsi la puissance de la pile pour une géométrie donnée, c'est-à-dire le rapport de la surface de contact au volume de l'élément thermogène pour une quantité donnée de réfrigérant en circulation, dépendra de la température à l'entrée du réfrigérant dans la pile :

$$Q \# (t_{2f}\,max - t_1) \qquad (5)$$

Voyons comment les conditions des différents paramètres correspondent à ces équations dans le cycle thermodynamique. On a calculé la dépense spécifique de chaleur et les grandeurs caractéristiques (températures) dans le cas d'une turbine à condensation d'une puissance de 50 MW avec une contre-pression de 0,04 atmosphère dans le condenseur, pour une série de pressions, et cela en tablant sur les pressions usuelles dans les pays européens. La surchauffe de la vapeur vive a été calculée de telle sorte que, sans surchauffe intermédiaire, l'humidité relative après expansion (sortie) est toujours égale à 0,13. Le réchauffement pour la régénération de l'eau d'alimentation est déterminé en partant de la température optimum. Les

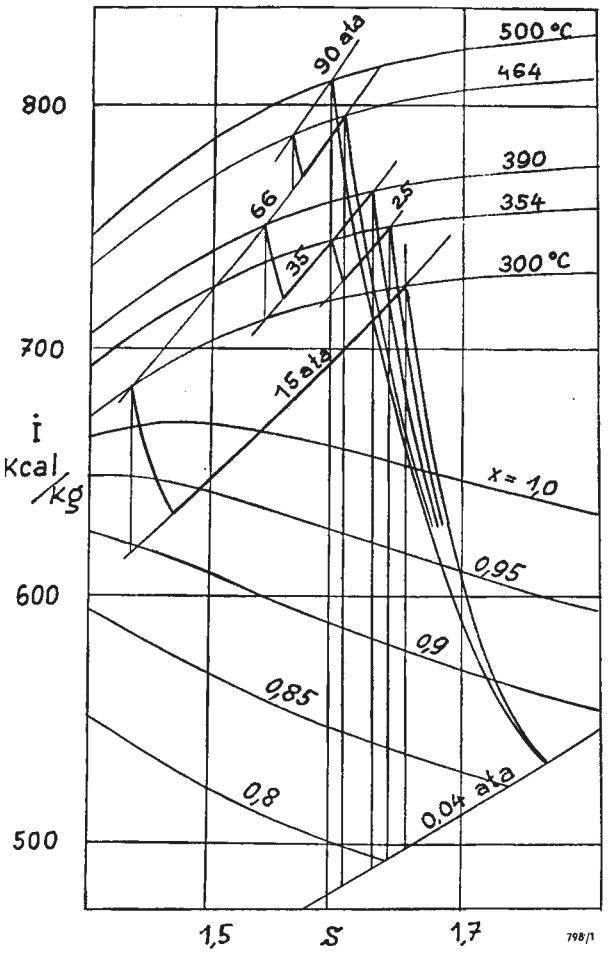


Figure 1. — Diagramme I-S d'une turbine à condensation de 50 000 kW pour des paramètres différents.

N. B. — Ata = atmosphères. Toutes les pressions indiquées sont des pressions absolues.

résultats sont consignés sur le tableau 1 et portés sur le diagramme (fig. 1).

Les températures du réfrigérant du circuit primaire ont été calculées en tenant compte de la différence de température dans l'échangeur thermique à 10 °C (au point de surchauffe maximum de la vapeur et au début de la vaporisation) et en

Tableau 1

Pression absolue (atmosphères)	Température de la vapeur vive (°C)	Température d'ébullition (°C)	Température de l'eau d'alimentation (°C)	Température du réfrigérant		Consommation spécifique (kcal/kWh)
				Entrée (°C)	Sortie (°C)	
15	300	198	101	188	310	2 980
15	354	223	128	207	364	2 710
35	390	242	147	223	400	2 560
66	464	281	185	251	474	2 315
90	500	302	207	266	510	2 210

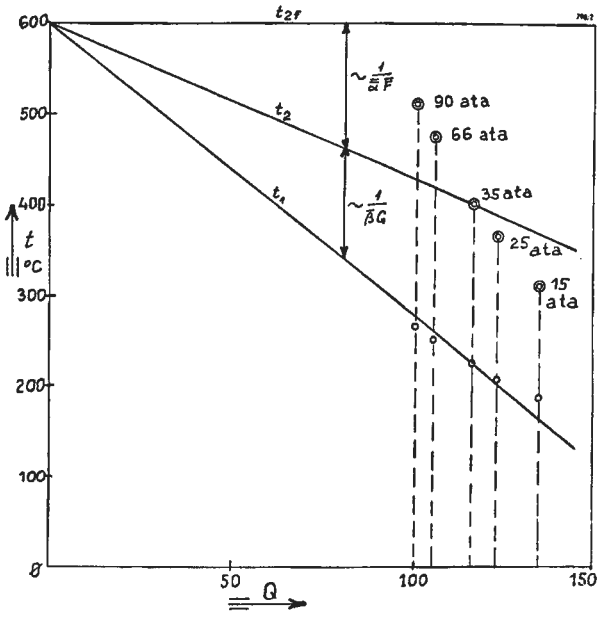


Figure 2. — Relation entre la puissance d'une pile et les températures à l'intérieur de la pile t_1, t_2, t_{2f}.

N. B. — Ata = atmosphères. Toutes les pressions indiquées sont des pressions absolues.

tenant compte aussi de la capacité thermique constante et du volume constant du réfrigérant pour toute la gamme des températures.

La figure 2 indique les températures du réfrigérant pour les différentes pressions d'un cycle de travail en fonction des dépenses spécifiques de chaleur calculées selon une échelle relative. Les points correspondants à la pression de 35 atmosphères sont sur des lignes droites qui indiquent la dépendance qui existe entre les températures et la puissance de la pile, étant donné une température maximum des éléments thermogènes et certaines conditions de transfert de la chaleur de la pile [d'après l'équation (*4*)].

Il découle de cette comparaison qu'aux divers paramètres du cycle du travail correspondent diverses conditions de transfert de la chaleur de la pile. L'augmentation des paramètres de la vapeur améliore considérablement les conditions d'évacuation de la vapeur dans le réfrigérant, étant donné l'accroissement considérable de l'écart des températures à la sortie et à l'entrée de la pile. L'augmentation des paramètres de la vapeur peut être considérée comme favorable à ce point de vue, car il y a non seulement réduction de la dépense spécifique de chaleur, mais encore possibilité d'atteindre la puissance spécifique de la pile, et cela surtout lorsque l'on utilise comme réfrigérant du circuit primaire des métaux liquides dont la chaleur spécifique est sensiblement inférieure à celle de l'eau.

Cependant, en passant à des valeurs plus élevées des paramètres de la vapeur, les conditions de transmission au réfrigérant primaire de la chaleur des éléments thermogènes deviennent défavorables, car la différence de température entre le combustible et ce réfrigérant diminue considérablement. Si l'on ne réussissait pas à augmenter suffisamment la surface de contact entre eux, il y aurait affaiblissement de la puissance spécifique de la pile. Ainsi, par exemple, si cette surface restait constante pour les différents paramètres, avec la même pile et pour des valeurs plus faibles des paramètres, cela nonobstant la dépense spécifique plus élevée correspondant à ces paramètres plus faibles, la puissance électrique obtenue croîtrait comme suit :

Tableau 2

Pression absolue (atmosphères) . . .	15	25	35	66	90
Chaleur dégagée . .	322	260	222	140	100
Consommation spécifique	135	123	116	105	100
Puissance électrique	248	211	191	134	100

Dans ce cas, on voit se présenter la condition spécifique pour la valeur optimum des paramètres du cycle de travail; en effet, par suite de la hausse de la dépense spécifique, la somme des dépenses d'exploitation pour le combustible augmente à son tour, tandis que, à la suite de l'augmentation de puissance de la pile, la part du capital investi dans la pile et dans les parties structurales diminue. Ce que l'on considère ici comme optimum, c'est que les frais d'exploitation soient aussi bas que possible (à condition d'obtenir un intérêt déterminé pour le capital investi) :

$$C = \alpha_1 \frac{K}{h} + \alpha_2 \frac{R}{hz} + qB + P. \ . \ . \ minimum \qquad (6a)$$

$$\frac{\partial C}{\partial p} = \theta \quad \frac{\partial K}{\partial p} \neq \theta \quad \frac{\partial P}{\partial p} \neq \theta \quad z = z(p), q = q(p)$$

$$-\frac{\alpha_2 R}{h z^2} \times \frac{\partial z}{\partial p} + B \frac{\partial q}{\partial p} = \theta$$

$$\frac{1}{z^2} \times \frac{\partial z}{\partial p} = \frac{\partial q}{\partial p} \frac{Bh}{\alpha_2 R} \qquad (7a)$$

En économie socialiste, on ne fait pas d'ordinaire entrer en ligne de compte l'intérêt rapporté par le capital investi. Dans ce cas, il faut considérer que l'objectif à atteindre est de réduire à un minimum le total des investissements et des frais d'exploitation pour une période déterminée, dix à quinze années par exemple.

$$S = K + \frac{R}{z} + qBhN + PhN \ . \ . \ . \ minimum \qquad (6b)$$

$$\frac{\partial S}{\partial p} = \theta - \frac{R}{z^2} \times \frac{\partial z}{\partial p} + BhN \frac{\partial q}{\partial p}$$

$$= \theta \frac{1}{z^2} \times \frac{\partial z}{\partial p} = \frac{\partial q}{\partial p} \times \frac{BhN}{R} \qquad (7b)$$

Si l'on prend, au lieu des différentielles, les différences entre les grandeurs des diverses variables du cycle thermodynamique, et qu'on opère la substitution dans les équations (*7a*) ou (*7b*), on peut obtenir la relation entre la valeur optimum et le rapport des dépenses de combustible aux dépenses pour la partie structurale de la pile, y compris le circuit primaire (si l'on considère les frais annuels, selon l'équation (*7a*), ou les frais cumulés, selon l'équation (*7b*).

Pour les données des cycles de travail de la vapeur, la valeur optimum se situe comme suit :

Pression absolue :	15-25	25-35	35-66	66-90	(atmosphères)
pour le rapport des dépenses:	0,59	0,71	2,03	5,07	

Bien entendu, ces déductions n'ont qu'une valeur conditionnelle. Tout d'abord, du fait qu'on utilise des paramètres inférieurs, les conditions du transfert de la chaleur par le réfrigérant primaire deviennent moins favorables, l'écart des températures à l'entrée et à la sortie de la pile diminuant aussi. Dans ces conditions, l'augmentation correspondante du volume en circulation pourrait paraître impossible, car il faudrait alors faire croître dans une mesure inadmissible la puissance nécessaire au pompage du circuit primaire. Des paramètres réduits créent des conditions favorables à l'emploi de l'eau pour le circuit primaire, car l'eau possède une chaleur spécifique élevée et une faible résistance au déplacement; mais alors il peut se présenter un nouveau facteur limite qui est la charge calorifique des parois séparant le combustible du réfrigérant, étant donné les indices élevés du transfert de chaleur (coefficient élevé du transfert de chaleur et différence de température).

Afin d'expliquer plus en détail le problème de l'interdépendance de la dépense spécifique de chaleur et de la puissance spécifique de la pile, nous avons calculé quelle est la dépense de chaleur au cas où l'on effectue une surchauffe intermédiaire de la vapeur. Pour certaines pressions, nous avons choisi une température plus basse de la vapeur vive, de façon que celle-ci soit égale à la température du cycle sans surchauffe intermédiaire à la pression qui, sur notre tableau, se lit à la ligne immédiatement inférieure. Nous n'avons pas tenu compte des pertes qui se produisent dans le circuit secondaire de surchauffe. Les chiffres couplés correspondants ont été établis dans le tableau 3, où l'on indique aussi les valeurs corrélatives des dépenses spécifiques et des puissances spécifiques.

Dans les cas ci-dessus, la puissance spécifique de la pile ne se limite pas au transfert de la chaleur du combustible au réfrigérateur. Ici, la puissance est calculée en partant de l'hypothèse que, dans les deux cas, le volume de réfrigérant en circulation est le même, et que la puissance thermique transférée décroît par suite de la diminution de l'écart de température du cycle avec surchauffe intermédiaire.

Les derniers chiffres couplés ont trait au cas extrême de surchauffe de la vapeur dans un cycle où la pression absolue est 66 atmosphères, et où la température de la vapeur est égale à la température du cycle sans surchauffe intermédiaire, la vapeur ayant une pression de 15 atmosphères.

La dépense spécifique, dans ce cycle à 66 atmosphères, n'est supérieure que de 6 pour cent à ce qu'elle est pour le cycle sans surchauffe intermédiaire sous la même pression et avec une température de la vapeur vive égale à 464 °C. Mais l'écart des températures dans le circuit primaire est ici sensiblement plus petit que pour le cycle de 15 atmosphères.

La surchauffe intermédiaire de la vapeur laisse évidemment une grande latitude pour adapter le cycle thermodynamique aux conditions d'évacuation de la chaleur de la pile suivant le choix que l'on fait pour le réfrigérant du circuit primaire, d'après son volume en circulation et les conditions de transfert de la chaleur du combustible à ce réfrigérant. Cependant, on ne peut songer à employer ce procédé

Tableau 3

Pression absolue (atmosphères)	Température de la vapeur (°C)	Température à l'entrée de la pile (°C)	Température à la sortie de la pile (°C)	Consommation spécifique (kcal/kWh)	Consommation spécifique relative	Puissance spécifique de la pile	Rapport limite des dépenses
25	354	207	364	2 710	107,5	109	1,20
35	354	230	364	2 520	100	100	
35	390	223	400	2 560	112,5	118,3	1,46
66	390	267	400	2 275	100	100	
66	464	251	474	2 315	106,2	116	1,09
90	464	274	474	2 180	100	100	
15	300	188	310	2 980	122,0	434	3,56
66	300	287	310	2 445	100	100	

que temporairement; il ne sera justifié que jusqu'au moment où on aura réussi à obtenir des matériaux de structure capables de supporter une température dépassant 600 °C et permettant d'utiliser une plus forte différence de température dans le circuit primaire avèc des paramètres supérieurs pour le cycle du travail. Cela permettrait d'augmenter encore davantage les paramètres (même en employant la surchauffe intermédiaire de vapeur afin d'augmenter ultérieurement le taux de rendement). L'opportunité d'une nouvelle augmentation des paramètres devient évidente si l'on compare le cycle de travail sous une pression absolue de 90 atmosphères à 500 °C avec le cycle sous une pression absolue de 175 atmosphères à 600 °C (dans les deux cas avec surchauffe intermédiaire de vapeur). L'économie de 8 pour cent ainsi réalisée sur les dépenses en combustible pourra justifier une certaine augmentation du capital investi, qui dépend du rapport entre les dépenses de combustible et les frais d'investissement dans la pile.

Une pile pourra fonctionner à des températures dépassant 600 °C, notamment si l'on utilise un combustible à l'état liquide. Cependant, en principe, on peut aussi utiliser un combustible à l'état solide, par exemple en stabilisant la phase de l'uranium par adjonction de certains éléments.

Piles d'où la chaleur est transférée au moyen d'un liquide qui se vaporise à l'intérieur de la pile

Ce type de pile peut être réalisé sous diverses formes. Au point de vue du transfert de la chaleur, les conditions sont les mêmes : il s'agit toujours d'un cycle avec un faible écart des températures du réfrigérant. Le processus est analogue à celui d'une chaudière à circulation directe. Cette analogie permet, pour élaborer cette méthode, de se baser sur les expériences que l'on a de la construction desdites chaudières. Cette modalité d'évacuation de la chaleur permet d'utiliser directement le réfrigérant dans le cycle de travail; mais elle exige en revanche une automatisation du fonctionnement de la turbine à vapeur, laquelle doit prendre place à l'intérieur du blindage de protection contre le rayonnement. Ce système permettra de faire des économies en ce qui concerne les échangeurs de chaleur, et l'on voit par là qu'il est possible de créer, grâce à des piles de ce genre, des centrales électriques peu coûteuses. Il est sensiblement plus simple de régler la puissance d'une pile de ce type, car la réactivité dépend dans une grande mesure de la chaleur dégagée. Mais pour bien assimiler le processus de changement de phase à l'intérieur de la pile, on doit résoudre au préalable une série de problèmes.

Ce mode de production d'énergie nucléaire peut être comparé avec le cas décrit dans l'alinéa précédent, où l'augmentation des dépenses de combustible sera contrebalancée par une diminution des investissements.

Piles dans lesquelles la chaleur dégagée est transférée directement par combustible liquide

C'est à ce type qu'appartient la pile homogène, mais il peut en être de même pour une pile à neutrons rapides ou une pile à ralentisseur solide dans les canaux desquelles le combustible nucléaire circule à l'état liquide sous forme de solution ou de suspension. Ce type de pile est très avantageux du point de vue de l'évacuation de la chaleur, car l'échange de chaleur entre le combustible nucléaire et le réfrigérant peut se faire à contre-courant, ce qui permet de réaliser les conditions les plus favorables d'échange thermique avec une différence minimum de température entre le combustible et le réfrigérant. C'est dans ce cas qu'on pourra utiliser le plus avantageusement les cycles de travail avec des valeurs limites des paramètres de la vapeur, dans lesquels les écarts les plus grands de température entre l'eau d'alimentation et la vapeur surchauffée permettent de réaliser une pile de haute puissance spécifique.

Importance d'un accroissement du taux de régénération du combustible

La plupart des projets actuels de centrales électronucléaires prévoient surtout l'emploi d'uranium-235 pour obtenir l'énergie nucléaire, car les sections efficaces pour la fission de cet isotope sont sensiblement supérieures à celles d'autres noyaux. De ce fait, le coût de l'uranium naturel doit, en pratique, être rapporté à l'uranium-235, dont le prix est cent quarante fois plus élevé que celui de l'uranium naturel. Si, en plus, on emploie de l'uranium enrichi par cet isotope fissile, le prix du combustible est fortement augmenté. Si, pour une première approximation, nous considérons le prix du plutonium naissant comme égal à celui de l'uranium-235, ce qui l'emportera dans l'estimation des dépenses de combustible intervenant dans les frais de production, ce sera non pas la dépense spécifique de chaleur, mais bien le rapport existant entre les dépenses de matières fissiles (uranium-235–plutonium) et l'énergie produite. Dès que, grâce aux procédés de régénération du combustible, ce rapport se rapprochera de zéro, cela signifiera que le coût du combustible dépensé est déterminé par le prix de l'uranium naturel, plus les dépenses afférentes au traitement du combustible après son emploi dans la pile.

Puisque la relation entre le coût de l'uranium naturel et celui des matières fissiles est, pour des raisons physiques, de l'ordre de 1 à 100 au moins, tandis que l'économie réalisée en augmentant l'efficacité totale du cycle thermodynamique ne dépasse pas le rapport de 1/15, il est évident que le meilleur moyen pour diminuer le poste combustible

des dépenses de production de l'énergie atomique est d'améliorer le taux de régénération des matières fissiles, et non pas d'augmenter l'efficacité totale de la transformation de l'énergie thermique en électricité. Ce n'est qu'après avoir obtenu une régénération complète ou plus poussée que l'on pourra, pour réduire les dépenses, attribuer toute sa valeur à l'augmentation de l'efficacité totale de la transformation de l'énergie thermique en électricité. En même temps, la diminution des frais de recyclage du combustible en vue de sa régénération prendra aussi de l'importance.

En résumant les considérations ci-dessus, on peut aboutir à la conclusion suivante sur l'importance de l'augmentation des paramètres du cycle thermodynamique.

1. L'économie réalisable en augmentant les paramètres et, par conséquent, en diminuant la dépense spécifique du combustible, pourra dans une certaine mesure trouver sa contrepartie dans la diminution de la puissance de la pile et, de ce fait, dans l'augmentation des capitaux investis (par kW de puissance installée).

Quant à la valeur optimum des paramètres, elle dépend avant tout du rapport entre les dépenses de combustible et le capital investi dans la partie structurale et le circuit primaire. Les autres composantes n'ont qu'une importance minime pour le calcul des paramètres.

2. La partie des frais généraux de production qui a trait aux dépenses de combustible peut être réduite surtout en augmentant le taux de régénération des matières fissiles et en diminuant les dépenses afférentes au traitement du combustible. Une fois que le problème aura été résolu de façon plus complète, et alors seulement, l'augmentation de l'efficacité totale du cycle thermodynamique acquerra de l'importance.

Il s'ensuit que, pendant les premières étapes de l'évolution des centrales électronucléaires, l'augmentation des paramètres du cycle thermodynamique et de l'efficacité totale ne constitue pas un problème majeur.

D'autre part, la mise au point de certains types de piles, notamment celles qui utilisent un combustible liquide ou qui évacuent la chaleur à l'aide d'un métal liquide, permet, moyennant quelques difficultés techniques, d'utiliser, pour le cycle thermodynamique, des paramètres plus élevés, ce qui offre certains avantages. Une fois que les problèmes initiaux sont bien résolus, le passage à des paramètres plus élevés est le principal moyen d'augmenter les puissances relatives de ces installations complexes et de diminuer encore, dans les frais globaux de production, la partie afférente aux dépenses de combustible. En outre, l'évacuation de la chaleur de la pile pose certains problèmes qui rappellent les problèmes du fonctionnement des centrales électriques à vapeur déjà existantes avec des paramètres plus élevés (surchauffe intermédiaire, haute qualité des matières employées, nécessité de l'épuration de l'eau d'alimentation, emploi d'un système de circulation directe pour l'obtention de la vapeur, etc.).

En conclusion, on peut affirmer que pour réaliser des progrès dans toutes les installations de production d'énergie thermique, la tendance à augmenter les paramètres se justifie; il en est également ainsi en ce qui concerne l'emploi de l'énergie nucléaire, car l'expérience que l'on possède déjà pourra servir, maintenant et dans l'avenir, à utiliser l'énergie nucléaire avec des paramètres plus élevés du cycle thermodynamique.

PERSPECTIVES DE LA CONSTRUCTION DE CENTRALES ÉLECTRONUCLÉAIRES

Pour en venir aux conditions économiques nécessaires à l'utilisation de l'énergie nucléaire, on peut dire que la construction des centrales électronucléaires traverse dans son développement plusieurs étapes. Ces étapes concernent non seulement l'amélioration des dispositifs expérimentaux, mais encore celle des installations industrielles reproduisant plus ou moins les types expérimentaux. Les raisons de ces étapes successives sont les suivantes : d'une part, l'on constate par l'expérience qu'il est impossible de résoudre à la perfection tous les problèmes en utilisant les modèles expérimentaux; en effet, il peut se présenter certaines avaries imprévues et, de plus, pour bien assimiler une technique nouvelle, il faut disposer non seulement de la qualité, mais aussi de la quantité. D'autre part, l'utilisation de l'énergie nucléaire présente un tel caractère d'urgence pour certains pays qu'il est impossible d'attendre que tous les problèmes soient parfaitement résolus sur le plan des installations expérimentales; il faudra de toute nécessité construire des centrales électronucléaires en vue de leur exploitation industrielle, même si leur mise au point n'en est qu'à un stade préliminaire.

Tout ceci nous amène à conclure que le développement des centrales électronucléaires nécessitera certains sacrifices de la part des groupes financiers qui prendront en charge la solution des problèmes. Une grande tâche de la coopération scientifique internationale consiste à s'efforcer de réduire au minimum les sacrifices faits par l'ensemble de toutes les nations. Comme exemple de coopération de ce genre, on peut citer l'aide importante accordée par l'Union soviétique aux démocraties populaires, qui donne à celles-ci la possibilité de franchir de nouvelles étapes dans le domaine de l'utilisation de l'énergie nucléaire, sans être obligées pour cela de faire appel à des ressources et des dépenses plus élevées.

Étant donné la nécessité d'envisager un développement rapide des centrales électronucléaires, il faudra construire ces premières installations industrielles avec un minimum d'investissements en capitaux, même si l'on admet des dépenses plus éle-

vées pour le combustible; en effet, si les investissements s'accroissent, on ne pourra compter sur des économies dans les frais de production pour accroître les délais d'amortissement.

Il importe aussi de comparer la production de l'électricité dans les centrales électronucléaires avec la production des centrales hydroélectriques qui, on le sait, se distinguent des centrales à vapeur par des frais de production moins élevés. Bien entendu, cet avantage est acquis moyennant des investissements plus élevés en capitaux. Si l'on calcule que toutes les dépenses dites permanentes (combustible mis à part) dans les centrales thermiques représentent annuellement à peu près 10 pour cent des capitaux investis et que les frais de combustible sont une à deux fois plus élevés que les dépenses permanentes (en moyenne 1,5 fois), dans les centrales thermiques, les dépenses annuelles totales constituent 25 pour cent environ des capitaux investis. Si, par exemple, les capitaux investis dans les centrales hydroélectriques sont deux fois plus élevés et si leurs frais de production constituent 2 à 5 pour cent des capitaux investis, la somme totale des investissements, ajoutée aux frais annuels, devient la même après cinq années de marche pour une centrale thermique et pour une centrale hydraulique de même puissance. Ce calcul n'est juste que si l'on considère une centrale électrique isolée. Mais si, dans un pays donné, on ne construit que des centrales hydrauliques ou que des centrales thermiques, la comparaison donne un résultat différent : avec un accroissement annuel de 10 pour cent de la puissance globale installée, les conditions restant les mêmes que dans l'exemple précédent, la somme totale des capitaux investis et des frais de production ne devient identique qu'après quatorze années de marche (voir fig. 3). Si les conditions sont moins favorables pour l'exploitation de l'énergie hydraulique, il peut arriver que les capitaux investis et les frais d'exploitation des centrales hydrauliques restent toujours supérieurs à ceux des centrales thermiques. Bien que l'exemple donné soit purement théorique, car les conditions de la construction varient continuellement, et l'on ne construit jamais des centrales électriques d'un seul et même type, on y trouve néanmoins confirmation du fait que, pour la construction en grand des centrales hydrauliques, l'économie nationale doit fournir d'immenses capitaux qui se trouvent ainsi « gelés » pour longtemps.

On constate ainsi qu'au point de vue du rapport entre les capitaux investis et les frais de production, les centrales électronucléaires se rapprochent davantage des centrales thermiques; de ce fait, nous pouvons affirmer que la construction des centrales nucléaires sera plus rationnelle que la construction des centrales hydrauliques si cette dernière doit se faire dans des conditions moins favorables.

Par opposition à ce qui se passe pour les centrales nucléaires à l'uranium naturel qui produisent en même temps du plutonium, si l'on considère la

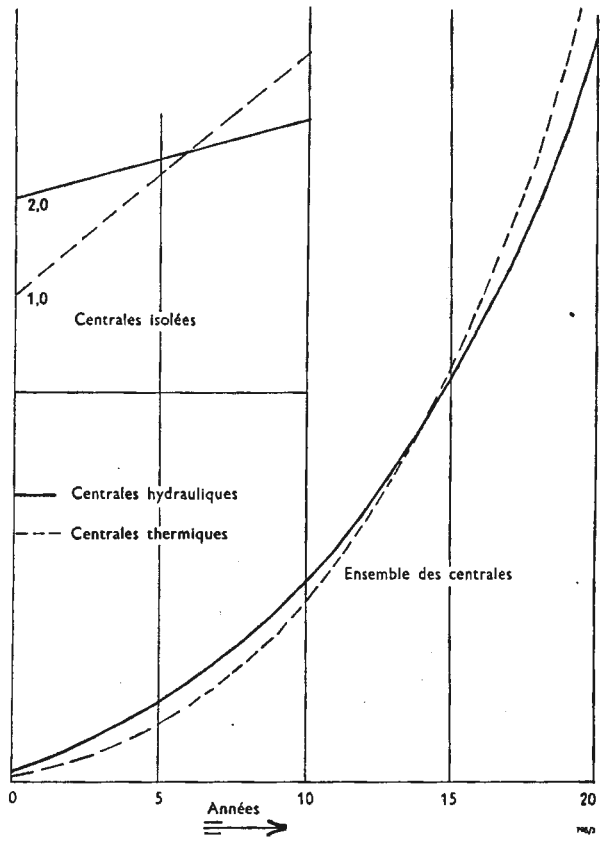


Figure 3. — Graphique des dépenses cumulées pour les centrales électriques avec accroissement annuel de puissance de 10 pour cent.

construction des futures centrales à neutrons rapides, il faudra compter avec la particularité que, pendant un certain temps, le coût du plutonium obtenu constituera un capital « mort ». Ce fait est noté, par exemple, dans le programme anglais de construction des centrales électronucléaires.

Un facteur important contribue à la baisse du coût de ces premières centrales nucléaires : leur automatisation, qui entraîne une réduction du personnel. Ce facteur joue notamment dans les pays où la plus grande partie de l'énergie électrique est produite en utilisant des charbons de faible pouvoir calorifique. Il arrive que, même dans des centrales dont la puissance est de 200 000 à 300 000 kW, on emploie environ trois ouvriers par 1 000 kW. Or, comme dans les centrales nucléaires il n'y a pas à manipuler d'énormes masses de charbon, il est possible de réduire le personnel de moitié et, par conséquent, de diminuer les frais de production de 5 à 7 pour cent par comparaison avec les centrales actuelles.

Dans les pays à très forte densité de population, il faut aussi prendre en considération la difficulté de choisir un terrain pour y construire de grandes centrales électriques. En effet, pour une distribution

rationnelle de l'énergie, il faut que ce terrain occupe une situation favorable quant au transport du combustible, quant à la possibilité de disposer des déchets de combustion, et enfin quant à l'alimentation en eau. Ces difficultés se traduisent par un renchérissement de la construction, et en particulier par des dépenses supplémentaires pour l'adduction d'eau ou le transport du combustible, qui représente environ de 10 à 15 pour cent des investissements globaux. Pour les centrales électronucléaires, on peut utiliser des terrains situés à proximité de points d'eau, et qui jusque-là n'avaient pu être utilisés à cause des difficultés de transport du combustible.

Pour la fourniture d'énergie électrique, il faut aussi investir des capitaux dans les lignes de transport et les réseaux de distribution, et cela représente de 50 à 100 pour cent des investissements dans les centrales électriques elles-mêmes. Si les centrales productrices se trouvent dans une situation excentrique par rapport aux centres de consommation, les investissements dans le réseau augmentent, disons de 15 à 25 pour cent. Étant donné la facilité de transport du combustible nucléaire, les centrales électronucléaires pourront être situées à proximité des centres de consommation et les investissements de capitaux supplémentaires pourront donc diminuer peut-être d'un quart. Dans ce cas, les réseaux à très haute tension ne serviront qu'au transport de l'énergie à petite distance, en liaison avec des bureaux de répartition et des interconnexions permettant l'alimentation d'un réseau par l'autre en cas d'avarie.

Dès que l'expérience acquise avec les premières centrales nucléaires aura apaisé les craintes suscitées par les projets d'installation de ces entreprises aux environs des agglomérations très denses, l'attention devra se porter sur l'emploi de l'énergie nucléaire en vue de l'approvisionnement en chaleur des grandes villes, cette chaleur étant produite en même temps que l'électricité par des centrales thermiques. De cette manière, il sera possible de diminuer sensiblement les frais entraînés par la construction du réseau thermique principal. L'adaptation des centrales nucléaires rendra possible l'introduction de ce mode centralisé de distribution de chaleur même dans les cas particulièrement difficiles où le chauffage central au charbon serait tout à fait impossible.

Il va de soi que ce qui précède intéresse surtout les régions où le manque de produits pétroliers ou de gaz naturel fait obstacle à l'installation d'un mode de chauffage adéquat.

Les considérations ci-dessus permettent de tirer les conclusions suivantes au sujet de l'emploi industriel de l'énergie atomique :

1. Lorsque la technique de production d'énergie électrique à partir de l'énergie nucléaire aura été bien assimilée (par transformation de la chaleur dans les génératrices à vapeur), c'est-à-dire lorsque nous en serons arrivés à l'emploi de paramètres correspondant à des pressions de 100 atmosphères et davantage, et lorsque nous aurons résolu le problème de la régénération des matières fissiles, cette énergie nous reviendra sensiblement moins cher que l'énergie produite à partir du charbon. Comme le rapport entre le capital investi et la production annuelle sera plus favorable que celui qu'on enregistre dans les centrales hydrauliques, il sera possible d'accélérer le rythme du progrès de la production de l'énergie électrique. Il s'ensuivra une accélération du rythme du développement de toute l'économie nationale, ce qui n'aurait pas été possible en utilisant de façon intensive l'énergie hydraulique dans des conditions moins favorables.

2. Même pendant l'étape intermédiaire où la centrale électronucléaire fonctionnerait avec des paramètres de vapeur inférieurs et où la matière fissile serait définitivement « dépensée », c'est-à-dire ne serait pas régénérée, certains facteurs permettraient tout de même de réaliser une certaine économie des dépenses. On arriverait ainsi à contrebalancer une augmentation éventuelle des capitaux investis ou des frais de production par rapport à ce qui a lieu dans les centrales électriques fonctionnant au charbon ou avec tout autre combustible.

LISTE DES SYMBOLES EMPLOYÉS

Q_1 = Chaleur émise par un élément en 1 seconde.

$\overline{\beta}$ = Chaleur spécifique moyenne du réfrigérant dans l'intervalle de température t_2–t_1.

G_1 = Poids du réfrigérant circulant le long d'un élément thermogène en 1 seconde.

t_1, t_2 = Températures du réfrigérant à l'entrée et à la sortie de la pile.

$\overline{\alpha}$ = Coefficient moyen du transfert de chaleur au réfrigérant à partir de l'élément thermogène.

$\overline{\overline{\alpha}}$ = Coefficient moyen du transfert de chaleur, calculé d'après la différence de température.

$\overline{F}$ = Surface d'un élément thermogène, calculée d'après le transfert de chaleur qui s'opère directement ou par l'intermédiaire des substances entourant l'élément.

$t_{2f}\,max$ = Température maximum du combustible dans l'élément thermogène.

Δt = Différence de température entre $t_{2f}\,max$ et t_2.

m = Coefficient pour le calcul de la différence de température réelle entre l'élément thermogène et le réfrigérant.

Q = Total de la chaleur dégagée dans la pile.

G = Poids total du réfrigérant traversant la pile en 1 seconde.

k, n = Coefficients de proportionnalité.

q = Dépense spécifique de chaleur.

z = Puissance spécifique de la pile (pour divers cycles thermodynamiques).

C = Frais globaux de production par kilowattheure.

K = Capital investi dans les centrales électriques (à l'exclusion de R), correspondant à 1 kilowatt de puissance.

R = Capitaux investis pour la partie structurale de la pile et le circuit primaire correspondant à 1 kW de puissance totale et à la puissance spécifique $z = 100$.

N = Nombre d'années de la période considérée.

B = Prix d'un kilowattheure de chaleur du combustible nucléaire.

P = Frais annuels de production (personnel, réparation) par kilowattheure.

p = Pression de la vapeur à l'entrée de la turbine.

S = Frais cumulés (capital investi plus dépenses annuelles pour une période de N années).

h = Nombre d'heures d'utilisation de la puissance d'une centrale électrique.

Rôle que peut jouer le thorium dans la production d'énergie nucléaire

par J. V. Dunworth*

DONNÉES NUCLÉAIRES

Les données nucléaires concernant le thorium et son noyau de fission associé, l'uranium-233, se trouvent dans d'autres mémoires présentés à la Conférence. Dans le présent mémoire, nous soulignons seulement les résultats pratiques : il est probable qu'une pile homogène à fission thermique, alimentée en thorium et en uranium-233, pourra réaliser son auto-alimentation en matière fissile, et il peut être possible de construire un type de pile ayant un facteur de gain peu élevé. La valeur exacte de ce facteur de gain sera déterminée tant par des considérations économiques, que d'après les plans de la construction et du fonctionnement de l'installation, mais on suppose que, dans les conditions les meilleures, il ne dépassera pas 10 pour cent (c'est-à-dire qu'en moyenne 1,1 atome d'uranium-233 sera utilement récupéré pour chaque atome d'uranium-233 consommé). Il convient de remarquer, cependant, qu'en pratique, cette valeur ne sera peut être pas atteinte.

Dans le cas d'une pile hétérogène qui emploie des cartouches en thorium solide contenant de l'uranium-233, on pense qu'il est possible de réaliser un type de pile qui soit exactement autorégénéré. On ne doit pas en déduire, cependant, que le thorium ne sera pas utilisé si le facteur de gain se trouve être légèrement négatif, de 5 pour cent par exemple. Dans ce cas, la pile pourrait consommer, suivant une évaluation très grossière, 20 atomes de thorium pour chaque atome d'uranium-235 ou de plutonium que nous lui fournirions.

DONNÉES RELATIVES A LA MÉTALLURGIE ET AU TRAITEMENT

Il est sans doute trop tôt pour avoir des idées arrêtées dans ce domaine, mais selon certaines indications générales, du point de vue chimique, comme du point de vue métallurgique, le système thorium-uranium est préférable au système uranium-238–plutonium. Encore une fois, nous renvoyons le lecteur aux mémoires concernant cette question présentés à la Conférence.

Original : anglais.

* Atomic Energy Research Establishment, Harwell.

MÉTHODE D'INTRODUCTION DU THORIUM DANS LA PILE

L'un des procédés possibles est de construire des piles hétérogènes à uranium naturel ou légèrement enrichi et, après avoir extrait du combustible environ 3 000 mégawatts-jour par tonne anglaise (environ 2 940 mégawatts-jour par tonne métrique) de chaleur, de réintroduire le combustible dans la pile, le plutonium extrait du combustible utilisé et le thorium constituant ainsi une partie du nouveau chargement. De cette façon, tous les chargements de la pile en matière fertile seraient constitués surtout par du thorium, sauf le premier ou les deux premiers, tandis que la matière fissile serait, peu de temps après, constituée surtout par de l'uranium-233. Toutefois, ainsi qu'on l'a indiqué plus haut, il peut être nécessaire de fournir à la pile du plutonium de façon continue et à petites doses. Ce plutonium pourrait être fabriqué si un petit secteur de la pile fonctionnait de façon permanente avec une alimentation en uranium naturel.

Dans le cas des piles homogènes, le schéma peut être très différent, suivant que l'on veut utiliser les combustibles du type plutonium–uranium-238 ou du type thorium–uranium-233. Si l'on se décide pour ce dernier, ainsi que cela semble probable, il sera tout à fait inopportun de commencer avec une alimentation de plutonium. Dans ce cas, c'est de l'uranium-233 extrait d'une pile hétérogène qui fournirait le chargement initial. Sinon, on doit pouvoir disposer d'uranium-235 provenant d'une installation de diffusion.

QUANTITÉS DE MATIÈRE FISSILE NÉCESSAIRES

Lorsque l'on pense à l'approvisionnement des installations de traitement, on peut estimer que le rendement pratique, dans une pile hétérogène, est compris entre 0,1 et 1,0 MW de puissance électrique par kilogramme de matière fissile contenue dans le combustible. Dans le cas d'une pile hétérogène dont le cœur est formé de matière fissile, ces rendements peuvent être dépassés dans le centre du cœur, mais lorsqu'on tient compte de la matière fissile retenue dans la couche de récupération qui entoure

le cœur l'estimation ci-dessus reste probablement plus ou moins correcte. Actuellement, l'Angleterre dispose de 20 000 MW de puissance électrique installée, puissance qui s'accroît de 2 000 MW par an. Si, à première vue, on admet la valeur d'un tiers de mégawatt de puissance électrique pour un kilogramme de matière fissile, il faudra six tonnes de matière fissile par an pour reconstituer les chargements initiaux au cas où la production nouvelle proviendrait dans sa totalité de centrales électronucléaires à thorium. C'est ce facteur et non pas un autre qui explique pourquoi l'utilisation du thorium dans les piles hétérogènes, selon toute apparence, ne peut se développer que lentement.

Lorsqu'il s'agit d'une pile homogène, il est possible de considérer des rendements totaux plus élevés, mais même dans ce cas, il est difficile de concevoir un rendement dépassant un mégawatt de puissance électrique par kilogramme de matière fissile contenue dans la pile, compte tenu de la matière qui se trouve dans la couche de récupération. Dans ce cas, le Royaume-Uni aurait besoin de deux tonnes de matière fissile par an, constituant immobilisation de capital.

QUANTITÉS DE THORIUM NÉCESSAIRES

Si l'on suppose qu'après irradiation dans une pile, le thorium est récupéré dans les installations de traitement, en vue d'une nouvelle utilisation, la consommation totale d'électricité du Royaume-Uni entraînerait l'achat de quinze tonnes par an seulement. Cependant, et fort heureusement pour les fournisseurs de thorium, les piles requièrent un premier apport.

Dans les piles hétérogènes, il est peu probable que des rendements d'environ 2 MW de puissance électrique par tonne de thorium soient dépassés, et ce dernier chiffre même est sans doute trop élevé, si l'on tient compte de la matière qui se trouve dans les usines de traitement. Le Royaume-Uni aurait donc besoin de 1 000 tonnes de thorium par an, au moins, pour les constructions nouvelles, si toutes les centrales électriques fonctionnaient grâce à l'énergie nucléaire, et étaient alimentées en thorium; en pratique, ce chiffre pourrait être largement dépassé.

La réserve de thorium utilisée dans une pile homogène peut être inférieure aux chiffres donnés plus haut pour la pile hétérogène, mais cela est loin d'être sûr.

TYPE DE PILE A FACTEUR DE GAIN NÉGATIF

Un système dont le facteur de gain négatif est de 5 pour cent, par exemple, reçoit 95 pour cent de son énergie du thorium, et 5 pour cent proviennent, soit du plutonium, soit de l'uranium-235. Chacune de ces deux éventualités n'implique l'utilisation que d'un faible pourcentage des atomes contenus dans l'uranium naturel. Dans le premier cas, l'extraction du plutonium produit par une pile à neutrons thermiques implique que l'uranium sera défourné plus tôt qu'il ne le faudrait autrement, alors que l'utilisation d'une installation de diffusion implique que l'on n'utilise qu'une faible proportion des atomes contenus dans l'uranium naturel. Supposons, par exemple, que le chiffre idéal de l'utilisation de l'uranium-235, dans le deuxième cas, soit de 100 pour cent. Ceci signifierait qu'un atome seulement sur 140 d'uranium naturel serait utilisé. Toujours à partir de cette hypothèse et avec un facteur de gain négatif de 5 pour cent, il faudra sept fois plus d'uranium que de thorium, en supposant que les pertes en thorium qui se produisent entre chaque traitement soient faibles, comparées à la quantité du thorium convertie en uranium-233 dans la pile. En se fondant sur ce chiffre, donné plus haut, de 15 tonnes de thorium effectivement utilisées par an pour approvisionner la Grande-Bretagne entière en électricité, la quantité nécessaire d'uranium serait de 105 tonnes par an. Même si 25 pour cent, seulement, de l'uranium-235 étaient extraits dans l'installation de diffusion, et que le facteur de gain négatif pour la pile à thorium–uranium-233 soit de 10 pour cent, la quantité d'uranium nécessaire ne serait encore que de 840 tonnes par an.

Si l'on fait fonctionner des piles autorégénératrices à neutrons rapides, on évite la nécessité d'avoir autant d'uranium puisque la matière fissile peut être transférée des piles à neutrons rapides aux piles à neutrons thermiques, alimentées au thorium.

TYPE DE PILE A FACTEUR DE GAIN POSITIF

Il a été suggéré que l'on pourrait obtenir un facteur de gain positif en utilisant une pile à thorium–uranium-233 et que ce facteur pourrait s'élever à 10 pour cent. Avec le rendement donné plus haut pour une pile homogène, le cycle de vie de l'uranium-233 est d'environ quatre mois et, dans ce cas, la réserve de matière fissile pourrait être doublée tous les deux ans et demi, environ. En pratique, il est sans doute plus raisonnable de compter sur une période de quatre ans, ou peut-être même beaucoup plus. Il faudrait attendre quarante ans ou davantage, s'il fallait produire plusieurs tonnes de matière fissile, en effectuant la régénération à partir d'un petit apport initial de quelques kilogrammes, avec un cycle de quatre ans pour doubler la quantité de matière.

En conséquence, l'autorégénération par une pile homogène à neutrons thermiques ne semble pas devoir jouer un rôle essentiel pour fournir les premiers chargements qui permettraient de construire une chaîne de ces piles. Peut-être le facteur de gain suffira-t-il pour fournir ultérieurement les premiers chargements qui permettront de faire face à l'augmentation naturelle de la production d'électricité.

D'autre part, il ne semble pas que le gain par régénération, s'il existe, pourra être suffisamment grand pour que la matière fissile produite en excès modifie sensiblement l'économie d'un type de pile, au cours des quinze années à venir, pendant les-

quelles la matière fissile destinée à l'usage civil sera peut-être encore plus abondante.

On voit, par conséquent, que l'obtention d'un facteur de gain positif avec une pile à neutrons thermiques, utilisant le thorium, n'a sans doute pas une importance décisive.

CONCLUSION

L'utilisation à grande échelle du thorium dans le Royaume-Uni est liée à la possibilité de se procurer des dizaines de tonnes de matière fissile. Lorsque cette situation se réalisera, il est probable que le thorium sera un combustible plus précieux que l'uranium même.

Il ne semble pas être très important d'obtenir un facteur de gain positif avec une pile à thorium–uranium-233. On peut tolérer un facteur de gain négatif, petit en valeur absolue.

NOTE. — Les données numériques, présentées dans le présent mémoire, sont purement théoriques, car l'auteur n'a pu se procurer de données pratiques, à partir de piles fonctionnant à l'échelle industrielle. Il ne pense pas cependant que l'incertitude des résultats actuels influe sur les conclusions générales présentées dans le présent mémoire.

Compte rendu des séances 4.1 et 4.2

Mardi 9 août 1955 (après-midi)

Président : M. F. Perrin (France)

Secrétaires scientifiques : MM. J. Goedkoop et J. Gaunt

PROGRAMME

4.1 Étude économique de la production d'énergie électronucléaire

P/476 Aspects économiques de la production d'énergie électronucléaire . . . . . J. A. Lane

P/390 Prix de revient de l'énergie et valeur marchande du plutonium provenant des premières centrales nucléaires. J. A. Jukes

Discussion

4.2 Le rôle du thorium

P/867 Le rôle que peut jouer le thorium dans la production d'énergie nucléaire . . . . . J. V. Dunworth

Discussion

4.1 Étude économique de la production d'énergie électronucléaire

M. Lane (États-Unis d'Amérique) présente le mémoire P/476.

M. Jukes (Royaume-Uni) présente le mémoire P/390.

DISCUSSION DES MÉMOIRES P/476 et P/390

M. Wigner (États-Unis d'Amérique) : M. Jukes pourrait-il nous donner encore quelques détails sur la production d'énergie par kilogramme d'uranium dans les centrales que l'on envisage d'installer, et également quelques renseignements sur la différence de température entre l'uranium et le gaz, ainsi que des données comparatives sur les conditions au centre de la pile et les conditions moyennes dans la pile ?

M. Jukes (Royaume-Uni) : Je crois pouvoir donner quelques détails complémentaires. Les piles seront alimentées avec de l'uranium naturel, peut-être très légèrement enrichi. Nous entendons par là que le pourcentage d'uranium-235 ne sera accru que de quelques centièmes, en sorte qu'au lieu de contenir 0,7 pour cent d'uranium-235, certaines cartouches actives en contiendront peut-être 0,75 pour cent. Ce très léger enrichissement mis à part, ces piles seront à l'uranium naturel, et, comme pour la plupart des autres piles à uranium naturel et à ralentisseur en graphite, la quantité de combustible nécessaire à chacune d'elles sera sans doute un peu supérieure à 100 tonnes; mais je ne crois pas que nous puissions indiquer une valeur précise avant d'avoir dressé les plans définitifs. La quantité de combustible sera probablement de 100 à 150 tonnes par pile, et chacune des centrales comportera deux piles. J'ai indiqué que les premières centrales développeront 150 mégawatts. Par conséquent, la production d'énergie sera légèrement supérieure à 0,5 mégawatt par tonne.

Peut-être pourrais-je dire encore quelques mots au sujet de l'enrichissement. Il a pour but d'accroître la souplesse d'exploitation. On peut notamment recourir à un léger enrichissement des éléments situés à la périphérie de la pile. S'il y a seulement de l'uranium naturel, le flux présente un maximum très accusé au centre de la pile, ce qui

limite la production d'énergie. La limitation de la puissance obtenue dans une pile de ce type tient en partie à la cartouche active, et c'est la question que M. Wigner vient de soulever. Certains mémoires qui seront présentés ultérieurement donneront des détails à ce sujet, mais on prévoit que la température de la cartouche active à Calder Hall sera de 400 °C à la surface. Si l'on enrichit une partie de l'uranium situé à la périphérie de la pile, on peut obtenir une répartition beaucoup plus uniforme du flux, ce qui permet à un bien plus grand nombre de cartouches actives — et non plus seulement à celles du centre — de produire le maximum de chaleur; la puissance s'en trouve augmentée. C'est pour cela qu'il peut être intéressant de procéder à un léger enrichissement.

M. J. Davis (Canada) : M. Jukes a été obligé de se fonder sur un certain nombre d'hypothèses dans ce domaine très complexe de l'économie. L'une de ces hypothèses consistait essentiellement à admettre que le prix du métal neuf (barres d'uranium) se maintiendrait à environ 10 livres sterling, soit 28 dollars, la livre (453 grammes) de métal. M. Jukes a aussi émis l'hypothèse que divers types de piles seraient construits. Je voudrais maintenant lui demander ce qui arriverait au cas — d'ailleurs probable — où le prix de l'uranium neuf sous forme de barres, baisserait de moitié, à la suite par exemple de la découverte d'une source abondante d'uranium dans le monde, d'une baisse des coûts de traitement du métal ou d'une diminution du coût de fabrication des barres de remplacement? J'ai l'impression, en me livrant à un rapide calcul, que si le prix du métal neuf baissait à peu près de moitié, le prix indiqué par M. Jukes serait modifié au point de permettre aux piles de concurrencer avec succès, au Royaume-Uni, les centrales thermiques alimentées au charbon. Je voudrais encore demander à M. Jukes ce que deviendrait le prix du plutonium si le prix de l'uranium de remplacement diminuait de moitié? Enfin ceci aurait-il des incidences en ce qui concerne les divers types de piles dont l'exploitation deviendrait rentable du fait d'une baisse sensible du métal de remplacement?

M. Jukes (Royaume-Uni) : Je désire tout d'abord rectifier un point sur lequel M. Davis m'a mal compris. Le prix de l'uranium que j'ai adopté pour base des évaluations était de 20 000 livres sterling par tonne de métal préparé et enrichi. La part des frais d'enrichissement et de fabrication est naturellement considérable, en sorte qu'une diminution du prix du minerai d'uranium naturel ne saurait entraîner une baisse de moitié sur le prix du métal préparé. Une baisse du prix de l'uranium naturel aurait évidemment pour effet de réduire tout d'abord le coût brut de l'énergie électrique produite par nos premières centrales, comme je viens de l'indiquer. Elle réduirait aussi le prix de revient net. Le mécanisme de ces incidences est extrêmement complexe, et j'aurais dû en parler. J'ai d'ailleurs abordé la question dans mon mémoire, mais je n'ai pas eu le temps de le faire lors de sa présentation orale. Il est évident qu'une variation du prix de l'uranium naturel entraînerait des changements considérables dans la valeur du plutonium. Il y a pour celle-ci une limite inférieure qui correspond à la valeur de ce métal en tant que produit de remplacement de l'uranium naturel dans les piles à uranium à neutrons thermiques, et une limite supérieure qui est liée au prix de revient de l'uranium-235 séparé. La limite inférieure dépend directement du coût de l'uranium naturel, la limite supérieure varie aussi, mais beaucoup moins, parce que le prix de revient de l'uranium-235 séparé ne dépend que pour une faible part du prix de l'uranium naturel.

Telles sont les limites de la baisse possible; mais si l'on tient compte de l'expérience passée et des possibilités d'évolution ultérieure, il est évident qu'à la longue, la situation d'équilibre que j'ai signalée dans mon mémoire pourra se trouver compromise. Une baisse du prix de l'uranium naturel favorisera les piles qui utilisent l'uranium naturel aux dépens de celles qui ne l'utilisent pas, les piles autorégénératrices à neutrons rapides par exemple; les avantages économiques relatifs des deux types de piles seront donc modifiés et l'on aura tendance à utiliser moins de matières fissiles pures et moins de piles au thorium. Tout cela devra entraîner une baisse encore plus forte des prix du plutonium, mais la baisse du prix de l'uranium au cours des dix à quinze années à venir n'affectera pas nécessairement l'hypothèse que j'ai faite en termes généraux dans mon mémoire, à savoir que le plutonium conservera un prix élevé pendant cette période parce que nous aurons encore besoin de ce métal pour l'enrichissement.

M. Mawson (Canada) : Les chiffres que vous avez donnés tiennent-ils compte du coût de l'évacuation des déchets, ou ce coût est-il tout à fait négligeable ?

M. Jukes (Royaume-Uni) : La question de l'évacuation des déchets se pose beaucoup plus pour les usines de traitement du combustible irradié que pour les piles. A la fin de mon mémoire, j'ai converti en prix nets les prix indicatifs que j'avais donnés pour le plutonium en tenant compte du coût du traitement, et j'ai indiqué que le coût du traitement du combustible irradié reviendrait à quelques livres sterling par gramme, et qu'il baisserait par la suite. Nous avons fait cette évaluation sur la base de l'expérience acquise dans nos installations de traitement actuelles. Ces prix de revient comprennent le coût de l'évacuation des déchets de nos usines.

4.2 *Le rôle du thorium*

M. Dunworth (Royaume-Uni) présente le mémoire P/867 et ajoute les observations ci-après : Je voudrais pour terminer parler des aspects économiques, et plus spécialement du prix du stock de matières fissiles que demande une pile. A raison de la moyenne que j'ai indiquée d'un tiers de méga-

watt par kilogramme de matière fissile pour une pile homogène, et en prenant pour base le prix de 9 000 livres sterling le kilogramme, la part totale des matières fissiles dans les frais d'investissement de la pile s'établit à 27 livres sterling par kilowatt de puissance électrique installée. Le chiffre de 9 000 livres sterling le kilogramme est donné comme une moyenne dans le mémoire qu'a présenté M. Jukes, et il coïncide aussi avec ceux qui ont été cités hier lors d'une conférence de presse donnée par la Commission de l'énergie atomique des États-Unis. Je crois qu'à la longue les rendements s'amélioreront, et qu'en outre le prix des matières fissiles baissera. En d'autres termes, il est probable que le coût de la matière fissile évalué à 27 livres sterling par kilowatt installé, baissera progressivement. Ce chiffre de 27 livres sterling est à comparer au coût total actuel afférent à une centrale alimentée en combustible classique, qui est d'environ 70 livres sterling par kilowatt installé. Les 27 livres sterling ne correspondent naturellement qu'à la matière fissile et non au coût total d'une pile au thorium. Autrement dit, l'alimentation d'une pile au thorium en matières fissiles ne sera pas d'un coût prohibitif; ce coût est, en fait, tout à fait acceptable.

Pour conclure, j'aimerais préciser, et c'est d'ailleurs évident, que l'utilisation du thorium à une échelle quelque peu importante implique la possibilité de disposer de dizaines de tonnes de matières fissiles. Ce qui n'est peut-être pas aussi évident, c'est qu'il ne sera probablement pas absolument indispensable d'avoir un facteur de gain positif avec un système mixte thorium–uranium-233. Il est probablement moins évident encore que l'on pourra, du point de vue économique, admettre un facteur de gain légèrement négatif. Je suis moi-même persuadé que le thorium sera un combustible important d'ici quinze ans.

DISCUSSION DU MÉMOIRE P/867

M. Lewis (Canada) : M. Dunworth a parlé dans son mémoire d'environ 3 000 mégawatts-jour par tonne. Que se passerait-il si le chiffre était porté, par exemple, à 5 000 mégawatts-jour par tonne, et que représente la quantité de thorium nécessaire ?

M. Dunworth (Royaume-Uni) : Dans ce mémoire, je suis parti de l'hypothèse que les 3 000 mégawatts-jour par tonne correspondent uniquement à l'uranium nécessaire pour fournir le supplément de matières fissiles. Si l'on passe à 5 000 mégawatts-jour, il est certain que la quantité d'uranium nécessaire sera réduite, probablement d'environ 25 pour cent. Nous touchons alors au point où le rendement n'est plus proportionnel et, en passant de 3 000 à 5 000 mégawatts-jour, nous aurons brûlé alors une part appréciable de l'uranium-235.

Séance 5

Le rôle de l'énergie nucléaire dans les cinquante prochaines années

LISTE DES MÉMOIRES

			Pages
P/893	Quelques considérations sur l'emploi de l'énergie nucléaire pour le développement économique des pays sous-développés	Département des affaires économiques et sociales, ONU	401
P/11	Prévisions économiques du rôle de l'énergie électronucléaire au Canada	J. Davis et W. B. Lewis	407
P/327	Intégration de l'énergie nucléaire parmi les moyens de production de l'énergie en France	P. Ailleret et P. Taranger	417
P/758	Rôle comparé de l'énergie nucléaire et des autres sources d'énergie	J. M. Kay	420
P/145	Importance de l'énergie nucléaire pour l'économie du Brésil	B. C. de Mattos et J. C. Ribeiro	426
P/1002	Rôle de l'énergie électronucléaire dans la République Argentine	P. E. Iraolagoitia	468
P/475	Les possibilités économiques de l'énergie d'origine nucléaire	K. M. Mayer	475
P/389	Contribution de l'énergie d'origine nucléaire aux ressources énergétiques du Royaume-Uni et du monde jusqu'en 1975	J. D. Cockcroft	484
P/1078	L'énergie nucléaire et l'Afrique du Sud	B. F. J. Schonland	487
P/468	Le rôle de l'énergie et celui de l'énergie nucléaire aux États-Unis	P. Sporn	490
P/810	Les perspectives de l'énergie électronucléaire à Porto Rico	A. Mayne et P. Mullenbach	504
P/849	Les États-Unis ont besoin de petites génératrices nucléaires	S. B. Morris	513
P/863	Rôle que peut jouer l'énergie nucléaire en tant que source d'énergie au cours des 25 à 50 années à venir	W. L. Cisler	518
P/1087	Rôle des centrales électronucléaires de puissance moyenne dans le développement futur de la civilisation, et leurs possibilités d'emploi en Uruguay	W. S. Hill et G. E. Villar	525

Quelques considérations sur l'emploi de l'énergie nucléaire pour le développement économique des pays sous-développés

par le Département des affaires économiques et sociales, Organisation des Nations Unies

I. PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE ACTUELLE ET DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUE

Il n'existe pas de critère absolu qui permette de classer un pays dans la catégorie des pays « sous-développés », pas même le chiffre peu élevé du revenu par habitant, qui cependant donne la mesure la plus précise de l'ensemble des caractéristiques directement observables. Pratiquement, d'ailleurs, les différents critères que l'on a utilisés donnent des résultats presque identiques. Les pays d'Asie, d'Afrique et de l'Amérique latine, à l'exception du Japon, de l'Union Sud-Africaine et de l'Argentine, ainsi que certains pays de l'Europe méridionale répondent à tous ou presque tous les critères du pays sous-développé. Dans les pays de ce genre, on trouve invariablement une forte proportion de la population (plus de 50 pour 100, et souvent même plus de 70 pour 100) occupée par la production de denrées alimentaires, avec un niveau d'immobilisations et une production moyenne par personne peu élevés.

La puissance installée des pays sous-développés est dans l'ensemble extrêmement faible par rapport à celle des régions industrielles du monde. En fait, la production et la consommation d'énergie par habitant sont en corrélation presque parfaite avec d'autres traits ou caractéristiques du sous-développement. En 1950, sur une puissance installée totale (hydraulique et thermique) estimée à 230 millions de kilowatts pour le monde entier, les pays sous-développés ne possédaient que 16,6 millions de kilowatts, soit 7,3 pour cent de la puissance installée totale. L'Amérique latine et l'Asie (non compris le Japon) disposaient chacune d'environ 7 millions de kilowatts, soit 3 pour cent; l'Afrique (non compris l'Union Sud-Africaine) et l'Océanie disposaient du reste : 2,5 millions de kilowatts, soit un peu plus de 1 pour cent.

Dans les pays sous-développés, les centrales sont situées en général dans les ports ou les grandes villes, et les autres régions — même lorsque la densité de population est forte — n'ont que peu de ressources en électricité ou n'en ont pas du tout. Même dans les ports ou les grandes villes, malgré leur situation privilégiée, la pénurie d'électricité est un trait caractéristique de la vie quotidienne, un obstacle au développement économique et une cause de mauvais rendement de la production.

Cette répartition géographique mal équilibrée d'une puissance installée totale déjà très insuffisante s'explique notamment par le manque de routes, de chemins de fer et d'autres moyens de transport. Ces moyens sont presque toujours indispensables, que ce soit pour tirer parti d'une chute d'eau ou pour acheminer le charbon ou le mazout vers une centrale thermique. Les capitaux nécessaires pour la création d'un réseau de transport rendent l'électrification d'un pays sous-développé plus coûteuse que celle d'un pays industriel. En outre, l'électrification des pays sous-développés entraîne de lourdes dépenses en devises, car il faut habituellement importer les machines et le matériel nécessaires pour l'équipement de la plupart des installations. D'autre part, le manque de capitaux pouvant être investis dans la capacité de production industrielle et agricole empêche l'accroissement continu et relativement prévisible de la demande de courant, ce qui pourrait constituer un stimulant efficace de l'électrification.

Dans ces conditions, le prix de revient de l'électricité demeure élevé, non seulement à cause de l'importance des mises de fonds, mais aussi en raison de frais de distribution élevés dus à l'absence d'une demande concentrée et d'un marché permettant l'installation de grandes centrales. Faute d'un réseau d'interconnexion général, on est obligé de disposer d'installations de secours pour compléter en période de pointe exceptionnelle la production d'usines relativement petites. Si, malgré un prix de revient élevé, on fixe les tarifs d'électricité à un niveau trop bas, on risque de voir les charges financières devenir excessives pour un petit budget, ou de voir disparaître tout stimulant à l'investissement de nouveaux capitaux dans la production d'énergie.

La pénurie d'énergie électrique, la répartition géographique mal équilibrée de la puissance installée et le niveau souvent élevé des tarifs entravent le

développement économique. Dans certains pays sous-développés, la consommation d'énergie est limitée ou rationnée même dans les villes [1] *. Pour se soustraire à la pénurie générale, les entreprises préfèrent produire elles-mêmes l'énergie dont elles ont besoin, ce qui augmente le coût et les risques de la production, contribue à maintenir le prix de revient de l'électricité à un niveau élevé et met obstacle à la création d'un réseau d'interconnexion.

En règle générale, les industries existantes se sont installées dans des endroits où elles pouvaient recevoir du courant électrique, c'est-à-dire, bien souvent, loin des sources d'approvisionnement en matières premières ou des centres nationaux de consommation. Ainsi, les produits, notamment les produits agricoles, seront transformés très loin des régions de production (ou même hors du pays sous-développé), ce qui tend à accroître les pertes et à augmenter les frais de transport et, de ce fait, les prix des marchandises, surtout ceux des produits alimentaires, aussi bien qu'à limiter l'offre des produits, alimentaires ou autres, dans les centres industriels et à réduire le marché de ces produits. Il y a lieu de rappeler également que les cours des produits de base à l'état brut sur le marché mondial varient plus fortement que ceux des produits qui ont subi une transformation. Les recettes des pays sous-développés provenant des exportations sont donc, non seulement plus faibles que celles des pays industriels, mais aussi plus aléatoires. Les fluctuations des recettes provenant des exportations comptent parmi les principaux obstacles au développement normal des pays sous-développés.

D'un autre côté, l'absence d'industries de transformation dans les campagnes a retardé le développement d'une économie de marché moderne dans les pays sous-développés et les problèmes que posent le sous-emploi saisonnier ou le chômage de la main-d'œuvre agricole sont restés sans solution. Le manque d'atelier de fabrication ou de réparation d'outillage dans les régions agricoles a freiné la productivité dans l'agriculture. Pour toutes ces raisons il y a eu d'importants mouvements de population des régions rurales vers les centres urbains déjà surpeuplés, ce qui parfois a mis en danger l'approvisionnement en denrées alimentaires et aggravé encore la pénurie d'électricité pour la consommation domestique et les services urbains. De même, on n'a pas réussi, dans les pays sous-développés, à créer des industries de transformation des matières importées, ce qui a privé ces pays de possibilités de progrès économique particulièrement intéressantes pour ceux d'entre eux qui sont surpeuplés. Beaucoup de pays sous-développés sont en effet des pays surpeuplés et qui ne connaissent que les techniques anciennes de production.

Le manque d'électricité a également des conséquences fâcheuses pour les industries extractives des pays sous-développés. C'est là un fait d'autant plus important que les exportations de produits minéraux sont une des principales sources de revenus et de devises pour nombre de ces pays. Avec les progrès techniques, les besoins en électricité pour la fusion et l'affinage des métaux ont beaucoup augmenté. Lorsque les minerais ne peuvent être affinés sur place mais doivent être exportés à l'état brut, des frais élevés de transport peuvent en rendre l'extraction peu rentable, à moins qu'il ne s'agisse de minerais à haute teneur. Qui plus est, les cours des minerais bruts subissent des fluctuations importantes.

On trouvera dans les pages qui suivent une étude sur la possibilité de remédier à ces inconvénients et à d'autres inconvénients de même nature par l'emploi de l'énergie nucléaire.

II. PRIX DE REVIENT DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE DANS LES PAYS SOUS-DÉVELOPPÉS

Aux fins de la présente étude, on a posé en principe que les principaux pays industriels mettront à la disposition des régions sous-développées le matériel et les renseignements techniques nécessaires et leur fourniront du combustible nucléaire à des conditions aussi avantageuses que celles qu'ils feront à leurs propres services publics. Aussi laissera-t-on ici de côté le prix de revient des combustibles nucléaires dans leur production et leur traitement.

Le prix de revient de la production d'énergie nucléaire

On possède peu de renseignements sur le prix de revient de la production d'énergie nucléaire. Les chiffres américains se situent entre 4 et 14 mills ** le kilowattheure. Le livre blanc britannique *A Programme of Nuclear Power* *** estime le prix de revient de l'énergie nucléaire en Grande-Bretagne à 7 mills (0,6 penny) le kilowattheure. D'après une estimation faite en U.R.S.S. ****, ce prix s'établirait à 2,5 kopecks le kilowattheure, non compris les charges financières; au taux officiel de change, ce dernier prix représenterait 6,25 mills et si l'on tenait compte des charges financières, il atteindrait 8 ou 9 mills.

Ces estimations n'ont certainement qu'un caractère provisoire, car l'expérience acquise à ce jour ne permet pas d'évaluer d'une manière précise

* Les numéros entre crochets renvoient à la bibliographie qui figure à la fin du mémoire.

** Un mill est un dixième de cent des États-Unis d'Amérique.

*** Cmd. 9389, février 1955.

**** *New York Times*, du 16 janvier 1955, citant un article de la *Komsomolskaya Pravda*. Dans cet article, on compare le prix de revient du kilowattheure d'origine nucléaire et celui du kilowattheure produit dans une centrale thermique moderne, qui seraient de 2,5 kopecks et de 3 kopecks respectivement.

tous les éléments du prix de revient. Une diminution du coût résultera probablement des perfectionnements qui seront apportés aux piles atomiques. D'après une information de source canadienne, on peut s'attendre à ce que le prix de revient du kilowattheure à la production soit ramené à 5 mills dans cinq ou dix ans.

Les éléments du prix de revient de la production d'énergie électrique d'origine nucléaire ou autre sont l'amortissement, l'intérêt des capitaux, le combustible, l'entretien, l'assurance, etc. L'amortissement est le plus important de ces éléments. On ignore encore quelle sera la durée moyenne d'une pile et on ne sait même pas si elle sera inférieure ou supérieure à celle d'une centrale thermique de type classique. Toutefois, on peut dire que le vieillissement technologique des piles — à distinguer de l'usure proprement dite — sera rapide au début, car il faut s'attendre à des perfectionnements fréquents. Pour ce qui est de l'usure, on compte dans la plupart des estimations officielles sur une durée de 15 à 20 ans, mais certaines sociétés américaines qu'intéresse la production d'énergie nucléaire estiment qu'il serait sage de compter sur une période de 7 à 12 ans *. Dans ces conditions, l'élément « usure et vieillissement » serait actuellement, semble-t-il, plus élevé pour une centrale électronucléaire que pour une centrale thermique de type classique.

En général, le coût de l'élément « combustible nucléaire » ne dépasserait pas un mill par kilowattheure mais, selon certaines estimations, il pourrait atteindre deux mills. Aux fins de la présente étude, on a utilisé le chiffre le plus faible. Étant donné que, dans ces conditions, le prix du combustible ne serait qu'un élément relativement peu important du prix de revient, une réduction du prix du combustible serait probablement sans grande conséquence.

On ne possède que peu de données sur le coût de l'élément « entretien et exploitation ». Un auteur [2] a supposé que le coût de cet élément était du même ordre pour une centrale électronucléaire que pour une centrale thermique de type classique. Mais, même en admettant que cette hypothèse soit exacte dans des pays industriels, on peut se demander dans quelle mesure elle serait valable dans les pays sous-développés, qui devront recruter à l'étranger le personnel hautement qualifié nécessaire pour la surveillance et l'entretien de centrales électronucléaires **.

Il ne faut pas oublier non plus que certains des facteurs qui tendent à augmenter le prix de revient des formes d'énergie classiques dans les pays sous-développés — le manque de personnel qualifié, les taux d'intérêt plus élevés, le manque d'ateliers de réparation, qui oblige à renvoyer dans les pays industriels les turbines à réparer, etc. — agiront de la même façon dans le cas de la production d'énergie nucléaire.

Aucune publication ne donne de renseignements sur l'élément « assurance ».

L'emploi de petites piles

Les recherches sur les coûts de construction et d'exploitation des piles ont porté presque exclusivement, jusqu'à présent, sur des types de grande puissance, de 50 000 à 100 000 kilowatts ou davantage. Toutes les piles commerciales en construction ou à l'étude appartiennent à cette catégorie, ce qui est normal si l'on considère que l'énergie nucléaire a été mise en valeur exclusivement dans des pays très industrialisés, où la forte consommation d'électricité justifie la production dans de grandes centrales [3].

La quantité d'énergie consommée actuellement dans la plupart des pays sous-développés, qui ne justifie pas la construction de grandes centrales thermiques, ne justifiera pas non plus, dans beaucoup de cas, la construction de piles atomiques de grande dimension. En d'autres termes, il faudrait que l'électricité d'origine nucléaire soit produite, dans ces pays, par des centrales d'une puissance relativement faible. Souvent, les piles auront à soutenir la concurrence de groupes diesel dispersés ***.

Du point de vue technique, la preuve est faite qu'il est possible de construire de petites piles. Une pile de ce genre fonctionne déjà à bord d'un sous-marin américain. On a aussi entrepris récemment des études en vue de la construction de petites piles pour locomotives et avions et il est probable que l'on parviendra à construire des piles qui soient de petite dimension et présentent certaines autres caractéristiques désirées ****.

A ce jour, on ne dispose pas de renseignements sur les aspects économiques de l'exploitation des petites piles. Toutefois, on peut supposer que les frais de combustible au kilowattheure ne seront pas

* Une centrale électronucléaire comprend deux parties, la pile proprement dite et les groupes turbo-générateurs. En ce qui concerne ces derniers, le calcul de l'amortissement ne pose pas de problèmes.

** Selon un article paru dans le numéro de mars 1955 de la revue *Nucleonics*, il serait inutilement coûteux d'engager des physiciens diplômés d'université dans le personnel permanent d'une centrale atomique. Selon cet article, étant donné l'équipement actuel de contrôle et de sécurité, il n'est nullement besoin d'avoir recours à un personnel ayant reçu une formation très spéciale.

*** Malgré un prix de revient supérieur, les besoins en électricité sont parfois si impérieux qu'ils ont amené certains pays à installer dans de vastes régions une multitude de petits groupes diesel. C'est le cas de l'Inde, par exemple. Le premier plan quinquennal de l'Inde prévoit une augmentation de 809 pour cent du nombre des moteurs diesel employés dans l'agriculture pour le pompage électrique de l'eau, malgré la nécessité d'importer le carburant. L'Inde cherche ainsi à accroître les superficies irriguées dans des régions qui ne disposeront sans doute pas avant longtemps d'un réseau de distribution d'énergie électrique.

**** Par exemple une faible consommation d'eau et une consommation lente de combustible.

sensiblement plus élevés pour une petite pile que pour une grande. Si le traitement du combustible a lieu dans de grands établissements, on peut supposer aussi que les mesures de sécurité, la manutention du combustible et les autres opérations ne coûteront pas davantage en moyenne que dans le cas d'une grande pile. Naturellement, le coût de construction moyen par kilowatt de puissance installée sera plus élevé pour une petite pile que pour une grande, mais cette différence s'atténuera peut-être avec le temps par la construction en série de petites piles relativement bon marché.

Étant donné qu'il faut comparer le prix de revient de l'énergie nucléaire produite en petites quantités au prix de revient de l'énergie de source classique produite dans les mêmes conditions, il y a lieu de faire remarquer que, dans ce dernier cas aussi, la production en petites quantités est relativement coûteuse.

C'est ainsi que le prix de revient de l'unité d'énergie électrique produite dans une centrale thermique d'une puissance inférieure à 10 000 kilowatts augmente à mesure que la puissance de la centrale diminue; lorsque cette puissance est inférieure à 5 000 kilowatts, l'emploi de moteurs diesel, qui produisent de l'électricité dont le prix de revient est relativement élevé, devient rentable. Si l'on tient compte en outre des possibilités d'économies sur les investissements annexes, le transport du combustible et les dépenses en devises, il se peut que de petites piles se révèlent particulièrement intéressantes pour les régions qui ne possèdent pas de réseau de moyens de transport perfectionné.

Le coefficient de charge

Comme on l'a déjà indiqué, l'amortissement représente l'élément le plus important du prix de revient de la production d'électricité dans des centrales nucléaires. Aussi le prix de revient du kilowattheure diminuera-t-il fortement à mesure qu'augmentera le coefficient de charge. Dans la plupart des études qui portent sur la question, on suppose que les centrales électronucléaires fonctionneront avec un coefficient de charge compris entre 80 et 90 pour cent, qu'elles ne seront utilisées que pour satisfaire la demande normale et que l'on fera appel à des centrales thermiques de secours du type classique pour satisfaire l'augmentation de la demande en période de pointe.

Néanmoins, dans les régions où les autres sources d'énergie électrique sont relativement chères, parce que l'on doit importer ou transporter le combustible, ou transporter le courant à de grandes distances, il se peut que l'exploitation d'une pile sous un coefficient de charge moins élevé soit malgré tout rentable. La valeur minimum que l'on pourra accepter pour ce coefficient dépendra notamment du prix de revient de l'électricité provenant d'une autre source d'énergie.

Le prix de revient de l'électricité à la production et à la consommation

Pour comparer le prix de revient probable de l'électricité d'origine nucléaire à celui de l'électricité provenant de sources classiques d'énergie, il faut distinguer prix de revient à la production et à la consommation, car c'est du point de vue des frais de transport et de distribution que l'énergie nucléaire pourrait présenter des avantages tout particuliers. Si, par exemple, l'exploitation de centrales nucléaires relativement petites s'avérait rentable, on pourrait fournir de l'électricité sans se heurter aux mêmes difficultés d'ordre géographique que l'on rencontre dans l'exploitation des sources d'énergie classiques.

Dans l'état actuel de la technique, le transport de l'énergie hydroélectrique au-delà de 650 à 800 kilomètres n'est pas rentable. Le charbon nécessaire aux centrales thermiques est une marchandise pondéreuse dont le transport est coûteux. Dans les pays où le coût de l'extraction est peu élevé, ce combustible peut supporter des frais de transport qui atteignent le double du coût de l'extraction, ce qui, en général, limite la distance rentable de transport par chemin de fer à un parcours de 500 à 650 kilomètres. Le transport du charbon par eau est intéressant sur de longues distances, mais on ne peut y avoir recours que dans les régions voisines de la mer ou de voies navigables intérieures. Le transport du pétrole et du gaz naturel sur de très longues distances n'est économique que si l'on peut utiliser des moyens de transport appropriés, par exemple pétroliers et pipelines. Seuls certains produits pétroliers très raffinés, comme l'essence (mais non le fuel-oil) peuvent supporter les frais correspondant à un long trajet par voie de terre.

Dans les pays sous-développés, certaines régions possèdent d'amples ressources en charbon bien situées par rapport aux centres de consommation. De même, il est parfois possible de produire de l'énergie hydroélectrique à relativement peu de frais par suite de l'existence d'emplacements propices et de débits d'eau appropriés. Cependant, le plus souvent, l'utilisation des sources d'énergie classiques exigerait le transport du courant à une longue distance, ce qui entraînerait des pertes non négligeables et une augmentation du prix à la consommation. Dans la plupart des régions sous-développées, les frais de transport de l'électricité sont sensiblement plus élevés que dans les pays industriels, du fait surtout que les quantités transportées sont plus faibles. En outre, les distances parcourues sont plus grandes, car la densité des consommateurs d'énergie est moins forte et la demande d'énergie est souvent à peu près nulle dans la région située entre la centrale et l'autre extrémité de la ligne de transport.

Si l'on tient compte du prix de revient de l'électricité à la consommation plutôt qu'à la production,

il se peut par conséquent que, pour beaucoup de régions sous-développées, l'utilisation de l'énergie nucléaire soit avantageuse, même si son prix de revient à la production est plus élevé que celui des autres formes d'énergie.

Les installations annexes

L'utilisation de nouvelles centrales exige d'autres investissements que ceux qui sont nécessaires pour assurer l'approvisionnement en charbon et la construction d'un réseau de transport d'énergie. C'est ainsi que, lorsqu'on ouvre une nouvelle mine, on peut avoir à construire des routes, des logements pour les mineurs, à déplacer certains services publics, etc. Le total des dépenses relatives à ces installations annexes peut atteindre un chiffre très élevé. La grande latitude dont on jouirait pour le choix d'un emplacement de centrale électronucléaire permettrait probablement de réaliser des économies sur ces investissements et, de ce fait, les avantages de l'emploi de cette forme d'énergie pourraient s'avérer décisifs. Lorsqu'on établira de nouveaux projets d'électrification, il serait bon par conséquent de tenir compte non seulement des dépenses nécessaires pour la construction des centrales de différents types, mais aussi des frais de construction de ces installations annexes.

Cas des pays où la production d'énergie dépend de l'importation de combustibles ou d'équipement

Les pays qui ont besoin d'importer des combustibles classiques ou des biens d'équipement pour augmenter leur production énergétique réaliseraient peut-être des économies de devises en recourant à l'énergie électronucléaire plutôt qu'à l'énergie électrique d'autres sources. Les économies de devises sont particulièrement importantes pour les pays sous-développés, où le processus de développement compromet l'équilibre de la balance des paiements, où les réserves de devises sont généralement faibles et où la capacité d'importation de biens d'équipement fixe souvent la limite des possibilités de développement.

Pour l'électricité thermique, les dépenses de combustible atteignent normalement de 3 à 5 mills par kilowattheure et peuvent être sensiblement plus élevées dans certaines régions sous-développées en raison de frais de transport et de manutention ou de prix à l'importation relativement élevés *. L'emploi de l'énergie nucléaire dans les régions sous-développées obligerait aussi à procéder à des importations de combustible nucléaire en provenance de pays fortement industrialisés, mais les dépenses de combustible nucléaire ne dépasseraient probablement pas un mill par kilowattheure produit, quel que soit l'emplacement de la pile. Il pourrait en résulter des économies de devises non négligeables.

Les économies de devises pouvant résulter du choix de l'énergie nucléaire dépendront, d'une part, d'une comparaison entre le coût en devises de la construction d'une centrale nucléaire et celui de la construction d'une centrale de type classique, et, d'autre part, des dépenses en devises à faire pour l'exploitation de la centrale, surtout les dépenses de combustible, dans le cas où le pays doit aussi importer des combustibles classiques. Pour ce qui est des dépenses de combustible, les centrales nucléaires permettront vraisemblablement d'effectuer des économies de devises considérables — toujours dans l'hypothèse où le pays doit importer des combustibles classiques —. En ce qui concerne le coût en devises de la construction, il sera souvent inférieur si l'on construit une centrale utilisant des sources d'énergie classiques, à moins naturellement que la construction de centrales nucléaires n'attire des capitaux étrangers qui ne s'investiraient pas dans une centrale de type classique. Un autre facteur complique la comparaison : c'est que les dépenses en devises pour la construction se traduisent par une sortie immédiate de devises, tandis que les économies de devises sur l'exploitation ne sont que des économies à venir. Étant donné les graves difficultés de paiements qu'ils rencontrent, beaucoup de pays sous-développés attacheront souvent moins d'importance aux économies futures qu'à des économies immédiates. Néanmoins, il y aura des cas où l'emploi de l'énergie nucléaire permettra sans aucun doute de réaliser des économies de devises.

III. CONCLUSIONS PROVISOIRES

Il se dégage de ces considérations un certain nombre de conclusions valables pour les pays sous-développés.

a) Dans le proche avenir, l'intérêt que présente l'énergie nucléaire pour les pays sous-développés ira croissant grâce à la possibilité de construire de petites plutôt que de grandes centrales nucléaires.

b) La possibilité d'une utilisation économique de l'énergie nucléaire est relativement importante dans les pays sous-développés, où l'insuffisance des moyens de transport et de certaines autres installations a entravé la création de réseaux de distribution d'énergie.

c) Les économies annuelles de devises qui pourront résulter de l'utilisation de l'énergie nucléaire seront importantes surtout pour ceux d'entre les pays sous-développés qui ont de graves difficultés de paiements et doivent importer des combustibles classiques.

Dans les pays sous-développés où ces conditions, ou certaines d'entre elles, se trouveront réunies, l'énergie nucléaire pourra contribuer à

* Dans les campagnes turques, le carburant diesel d'importation vaut de 350 à 400 livres turques la tonne (125 à 145 dollars). L'élément « combustible » du prix de revient de la production d'électricité à partir de combustible diesel atteint 0,1 livre turque par kilowattheure (environ 36 mills).

accélérer le rythme du développement général, le rendre plus uniforme dans l'ensemble d'un pays et faciliter la diversification de l'économie par la création de nouvelles industries consommatrices d'énergie, par la simplification des méthodes d'exploitation des ressources minérales et par l'électrification des campagnes.

Seules des recherches peuvent permettre de dire dans quelle mesure l'emploi de l'énergie nucléaire se justifie dans une région ou un pays donné. On peut distinguer trois catégories de régions suivant leur richesse en ressources énergétiques de type classique et le développement de leur réseau de distribution d'énergie électrique :

a) *Régions non électrifiées riches en ressources énergétiques de type classique.* — Il sera avantageux d'utiliser ces ressources si la distance des centres de consommation n'est pas telle qu'elle fasse du transport de l'énergie ou du combustible une opération non rentable. Lorsque cette distance est considérable (comme c'est souvent le cas dans les pays très étendus), on aura peut-être avantage à construire des centrales nucléaires.

b) *Régions pauvres en ressources énergétiques de type classique, mais qui produisent d'assez grandes quantités d'énergie à partir de combustibles classiques qu'elles importent.* — Peut-être sera-t-il parfois avantageux de construire des centrales nucléaires, en raison des économies de devises que l'on pourra réaliser sur l'importation de combustible.

c) *Régions non électrifiées dépourvues de ressources énergétiques de type classique.* — On aura probablement avantage à les électrifier en construisant des centrales nucléaires, dans tous les cas où l'on ne peut pas importer à bon compte des combustibles classiques ou de l'énergie électrique.

Bien qu'il soit évidemment impossible de généraliser à partir de faits encore peu nombreux, il semble que les avantages de l'énergie nucléaire soient appelés à l'emporter sur ceux des sources d'énergie classiques. Cependant, l'installation de piles atomiques n'est pas encore chose aisée. La technologie des piles en est encore à ses débuts et l'emploi de petites piles, emploi qui revêt une importance toute particulière pour les pays sous-développés, ne se répandra que si leur coût de construction diminue.

Pour terminer, il conviendrait peut-être de citer un passage tiré du livre blanc britannique auquel il a été fait allusion ci-dessus :

« L'énergie est à la base de notre civilisation. L'amélioration du niveau de vie, dans les pays industriels avancés comme le nôtre et dans les vastes pays sous-développés d'outre-mer, ne sera rendue possible que par une plus grande consommation d'énergie. Le taux d'accroissement nécessaire est si élevé qu'il faudra pousser à l'extrême limite l'exploitation des ressources d'énergie existantes. Quelles que soient les incertitudes actuelles, on parviendra un jour à produire économiquement de l'énergie d'origine nucléaire. De plus, c'est là une source d'énergie dont les réserves sont beaucoup plus vastes que celles des sources d'énergie actuelles. L'avènement de l'énergie d'origine nucléaire marque donc le début d'une ère nouvelle. »

BIBLIOGRAPHIE

1. *Étude économique sur l'Asie et l'Extrême-Orient, 1954*, Bangkok, 1955, chapitre 2, publication des Nations Unies.
2. Lane James A., *Growth Potential of U.S. Nuclear Power Industry*, Nucleonics, juin 1954.
3. LeClaire Titus G., *Economic Considerations in Locating Power Reactors*, Atomic Energy in Industry, 1955, National Industrial Conference Board, Inc., p. 89-90.

Prévisions économiques du rôle de l'énergie électronucléaire au Canada

par J. Davis* et W. B. Lewis**

Le Canada possède d'abondantes ressources pour la production d'électricité. Un grand nombre des emplacements aptes à la production d'énergie électrique dans le pays, outre qu'ils sont bien situés, ont pu être exploités à des frais relativement peu élevés. Ces centrales, l'abondance de charbon extrait à ciel ouvert dans certaines régions, et la découverte plus récente de pétrole et de gaz dans d'autres, expliquent que le prix de l'énergie électrique dans le pays soit relativement faible.

Toutefois, à partir d'aujourd'hui, ces avantages peuvent être moins accusés; il y aura naturellement des exceptions. De grands projets d'énergie hydraulique, utilisant les marées, ou proches de fleuves où la marée se fait sentir, continueront sans aucun doute à attirer les grandes industries électriques vers certaines des régions les moins développées du pays. Mais, en ce qui concerne les régions plus industrialisées, il faut s'attendre que le prix de l'énergie subisse une hausse. Et cela peut se produire malgré des améliorations sensibles du transport à longue distance et une augmentation encore accrue du rendement des centrales brûlant des combustibles de type classique.

La naissance de l'énergie nucléaire aura donc d'importantes incidences. Le moins qu'elle puisse faire sera de fixer un plafond au coût de production de l'énergie dans les régions moins avantagées du pays. Probablement et à cause du fait qu'elle nivellera les prix, elle réduira les écarts importants qui existent maintenant entre le prix de l'électricité dans une région consommatrice d'énergie et celui d'une autre.

On s'attend à ce que le rôle principal revienne aux centrales nucléaires moyennes ou grandes assurant la charge de base, et ayant une capacité de 100 000 kWh ou davantage. D'autres centrales de toutes puissances jusqu'au type de centrale ayant une puissance maximum de quelques milliers de kilowatts seulement pourront aussi jouer un rôle utile. Toutefois, leur contribution à la production d'énergie totale sera beaucoup plus modeste. Le présent document se limitera donc à examiner l'économie de grandes centrales.

Original : anglais.

* Economics Branch, Department of Trade and Commerce, Ottawa.

** Vice-Président, Research and Development, Atomic Energy of Canada Limited, Chalk River, Ontario.

PRÉVISIONS DU COÛT DE L'ÉNERGIE

Limitons-nous au début à examiner les coûts. Examinons sommairement les prévisions des coûts que l'on peut prévoir pour l'énergie électronucléaire. Et en les comparant à des données analogues sur les moyens plus classiques de production d'électricité, déterminons quand et dans quelle mesure l'énergie atomique pourra compléter nos ressources connues de production d'énergie électrique.

Que connaissons-nous déjà de ces coûts et que pouvons-nous conjecturer? Comme nous manquons d'expérience directe, nous devons voir ce que nous pouvons tirer des faits déjà connus et de notre raisonnement.

On peut énoncer sommairement le cas de la manière suivante. La fission nucléaire nous promet un combustible entièrement nouveau ou une source de chaleur toute nouvelle, et pour ce faire requiert la mise au point d'un nouveau type de chambre de chauffe. L'économie principale, et peut-être la seule qu'elle permettra, peut donc porter sur ce que l'on appelle le coût du combustible. Pour contrebalancer cela, on peut se demander dans quelle mesure il faut tenir compte des lourdes charges de capital qu'entraînera cette utilisation nouvelle. Les premiers coûts d'une centrale nucléaire comprendront évidemment l'achat des terrains, la construction des bâtiments, des machines et de l'équipement dont on a besoin pour transformer la vapeur en électricité, et ce sont là des éléments qui sont communs aux centrales thermiques du type classique mais, en plus de ces frais, il faut ajouter les dépenses qu'entraînera la construction de la pile, de son usine de préparation des combustibles qui peut se trouver dans un autre endroit et le stock de matières spéciales qui entrent également dans le fonctionnement de la pile.

La caractéristique la plus séduisante de l'énergie nucléaire est, nous l'avons déjà dit, le faible coût des combustibles. En fait, ce coût peut être si faible que l'économie des futures centrales atomiques ressemblera davantage à celle des installations

hydroélectriques qu'à celle des centrales thermiques utilisant le charbon ou le pétrole. Ceci est confirmé par le tableau 1 qui montre l'importance relative des coûts variables et fixes dans ces différents types de centrales.

Tableau 1

Pourcentage des frais totaux de production [a]

Catégorie des frais	Centrales thermiques utilisant le charbon, le pétrole, le gaz [b]	Centrales hydrauliques	Centrales nucléaires
Frais variables [c]	50	15	10 - 30
Frais fixes [d] . .	50	85	70 - 90
	100	100	100

[a] Pour les centrales d'une capacité de 100 000 kW fonctionnant avec un coefficient aux bornes de 80 pour cent.
[b] Les centrales électriques à moteur diesel n'ayant que rarement une puissance supérieure à 10 000 kW ne sont pas prises en considération dans ce document.
[c] Dépenses de production y compris combustible, main-d'œuvre, surveillance, entretien, travaux mécaniques et fournitures diverses.
[d] Frais annuels et périodiques comprenant les intérêts, l'amortissement, les assurances, les impôts, les loyers et les dividendes.

Sous la rubrique de « frais variables », le coût de la main-d'œuvre, de la surveillance, de l'entretien et des divers approvisionnements nécessaires à une centrale atomique sera, à longue échéance, comparable sans doute à celui de nos centrales thermiques actuelles. Par contre, les dépenses de combustibles peuvent varier considérablement. Elles dépendront du prix de l'uranium naturel, du degré de rendement des piles, de la mesure dans laquelle le combustible en partie épuisé peut être récupéré et de l'efficacité avec laquelle on peut transformer l'énergie thermique en énergie électrique.

Les coûts du combustible seront probablement les plus élevés (disons 25 pour cent ou davantage du prix total de l'électricité) dans une centrale nucléaire consommant de l'uranium naturel qui ne serait utilisé qu'une seule fois sans recyclage. Dans ces circonstances, ce que nous savons actuellement de l'exploitation des piles ne nous garantit pas que même un demi pour cent du combustible brut serait effectivement consumé. La substance qui reste (y compris une certaine quantité d'uranium-235 et son sous-produit, le plutonium) serait, du moins pour le moment, éliminée avec les cendres radioactives formées pendant que le combustible a subi la fission dans la pile. Même ainsi, la part du coût du combustible peut être bien moindre que pour un charbon de prix moyen.

Les prix des matières premières seraient les plus faibles (disons 5 pour cent ou moins) dans une pile régénératrice brûlant ce qui serait, pour une large part, de la matière récupérée et ne recevant d'uranium naturel (ou de thorium) que pour compenser les pertes qu'entraîne un nouveau traitement chimique.

En pratique, il peut être avantageux de choisir une méthode qui se placerait entre ces deux extrêmes. Nous pouvons espérer, par exemple, qu'une quantité donnée de matières fissiles pourra être récupérée et réintroduite dans la pile à un prix qui serait bien inférieur à celui d'une quantité équivalente d'uranium naturel. La réintroduction dans le circuit sera donc avantageuse jusqu'à une limite fixée par la désintégration complète du contenu fissile total de la matière utilisée. Lorsqu'on utilise un procédé à passages multiples, le coût réel du combustible peut donc approcher les dépenses qu'entraînerait un nouveau traitement des cartouches combustibles elles-mêmes. Les indications actuelles montrent que ce coût total des combustibles s'approcherait de 20 pour cent du coût total de l'électricité produite au moyen de l'énergie nucléaire.

Même si la fission nucléaire peut un jour supprimer les deux tiers ou davantage des dépenses qu'entraîne l'achat de charbon ou de pétrole, les frais de capitaux qu'entraînent la construction et l'équipement des centrales nucléaires pourraient encore être prohibitifs. On manque d'expérience à ce sujet et il se peut qu'on ne puisse disposer d'estimations valables avant quelques années encore. Mais il semble déjà que les frais fixes relatifs aux centrales nucléaires peuvent être comparables à ceux qu'on associe d'habitude à la production d'électricité à partir de l'énergie hydraulique (c'est-à-dire 200 à 300 dollars par watt de puissance). Il est peu vraisemblable que dans les 10 ou 15 années à venir ces coûts soient réduits au chiffre de dépenses qu'entraînent normalement la construction et l'équipement de centrales thermiques modernes brûlant dcu harbon, du pétrole ou du gaz (c'est-à-dire 120 à 180 dollars par watt de puissance).

On parviendra sans aucun doute à faire des économies substantielles. L'expérience acquise pour la construction et l'exploitation de chaque pile permettra de réaliser de nouvelles économies; l'utilisation de matériaux de construction nouveaux peut être réduite au minimum. L'immobilisation de combustible ou des substances servant à ralentir et à refroidir peut être diminuée, et ce dans une forte proportion. Le succès de l'énergie nucléaire peut aussi apporter d'autres avantages. On pourrait utiliser une ou plusieurs usines chimiques ayant une situation centrale pour effectuer le traitement du combustible d'un grand nombre de centrales éloignées les unes des autres; ceci s'accompagnant d'une nouvelle baisse des prix de la plupart des matières premières nucléaires entraînerait sans aucun doute une nouvelle réduction des frais fixes qui sont liés à la mise en valeur de cette nouvelle source d'énergie électrique.

Les dépenses en capitaux initiales pour l'usine, l'équipement et les stocks de matières premières

constituent l'un de nos critères. Le taux auquel on peut les amortir en est un autre. Il faut tenir compte des deux lorsque l'on estime les frais fixes que devra absorber l'énergie nucléaire. Faute d'expérience, il faudra calculer que les premières centrales électronucléaires auront une existence relativement courte. A cet égard, elles seront très désavantagées si on les compare aux centrales hydrauliques pour lesquelles nous disposons d'une expérience prolongée et dont le taux d'entretien est faible. En fait, tant que nous n'aurons pas plusieurs dizaines d'années d'expérience, les taux d'amortissement dépasseront probablement d'un certain pourcentage ceux que l'on associe normalement aux types plus classiques de centrales thermiques. Il faut envisager que les piles des centrales électronucléaires du Canada, construites aux alentours de l'année 1970, devront être amorties en 15 ou 20 ans. Plus tard, à mesure que le rendement des piles s'améliorera, on pourra étendre cette durée à 25 ou 30 ans, c'est-à-dire à une vie comptable semblable à celle des centrales thermiques utilisant le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Il devient de plus en plus habituel dans ces centrales d'obtenir un accroissement de rendement qui entraîne des dépenses supplémentaires parce que l'entretien ou le remplacement des cartouches augmente. Ceci s'étend même aux turbines hydrauliques et il faut s'attendre que cette coutume de remplacer davantage les cartouches deviendra habituelle aussi dans les centrales nucléaires. Pour ces raisons, on ne s'attend pas que l'on puisse espérer une vie de 40 à 50 ans comme on l'obtient souvent pour les centrales hydrauliques.

La nécessité de prévoir un taux de vieillissement rapide est un obstacle initial, mais ce n'est là nullement nouveau. La plupart des procédés révolutionnaires, particulièrement ceux de l'industrie chimique, ont, pour des raisons techniques, souffert d'obstacles semblables au début. Cependant, parce qu'ils entraînent des économies exceptionnelles et quelquefois tout à fait inattendues, ils n'ont pas été longs à se faire une place sur le marché commercial.

Une chose qui aidera plus que toute autre est que ces usines pourront être exploitées à pleine puissance, ou presque. Les arrêts coûteront cher à cause de l'importance des frais fixes. Pour pouvoir concurrencer les autres sources d'énergie, nos centrales électronucléaires devront donc être mises au point avec une sûreté de marche très élevée. Puis, une fois cette possibilité démontrée * et si on atteint un niveau des coûts un peu plus avantageux que pour les meilleures autres sources d'électricité, ces centrales pourront être consacrées à faire face à la demande continue par opposition à la demande variable de certains réseaux particuliers. En d'autres termes, l'exploitation de nos centrales nucléaires devra être évaluée par rapport à celle des autres centrales servant à assurer actuellement la charge de base de ce réseau ou de cette industrie.

Jusqu'ici, nous avons pu éviter de faire état de données spécifiques sur les coûts. Nous disposons toutefois de prévisions que nous pouvons utiliser pour illustrer de manière générale différentes caractéristiques de coûts des centrales conventionnelles thermiques et hydroélectriques et aussi des centrales électronucléaires assurant la charge de base (voir tableau 2).

Le tableau 2 est intéressant pour diverses raisons. Il nous montre que nous ne pouvons nous permettre un choix arbitraire du type de centrale qui est le mieux adapté à un service donné de charge de base. De toute évidence, l'énergie hydraulique est à préférer, étant donné que nous supposons qu'elle est avantageuse financièrement, lorsque les dépenses en capital pour la mise en valeur d'un nouvel emplacement hydraulique peuvent être maintenues en-dessous de 400 dollars par kilowatt de puissance installée. C'est là un plafond qui doit cependant être revisé vers le bas à mesure qu'augmente la distance entre l'usine de production et le principal centre de consommation.

Les frais de transport peuvent être un facteur de compensation assez important. On peut utiliser une marge de 1 millième de dollar par kilowattheure par 250 milles (375 km environ de ligne principale de force) pour estimer *grosso modo* les inconvénients que l'on peut rencontrer lorsqu'il s'agit d'installations éloignées.

Si l'on jette un regard vers l'avenir, les coûts à la centrale resteront probablement relativement stables. En raison du désavantage croissant de la distance, les coûts des matériaux de construction et de l'équipement de l'usine monteront. Cette tendance pourrait être contrebalancée par de nouveaux progrès dans l'utilisation du matériel de terrassement, dans la technique de construction des tunnels et dans la construction de réservoirs d'accumulation en des endroits bien placés pour augmenter la puissance existante. Nous en revenons donc au transport de l'énergie qui est coûteux. Il est indubitable que là aussi on fera de grands progrès. Mais il est difficile de croire que l'économie que l'on réalisera grâce au transport en voltage extrêmement élevé ou au transport direct sera telle qu'elle limitera le prix de l'énergie hydroélectrique à la livraison.

L'économie d'une centrale thermique brûlant des combustibles de type classique dépend d'habitude dans une bien plus large mesure des frais variables (coûts qui suivent plus ou moins le niveau de la production d'énergie). Lorsqu'on extrait sur place le charbon à ciel ouvert ou le gaz naturel, les dépenses de combustibles peuvent être maintenues au minimum. Elles peuvent être si basses en fait qu'elles peuvent éliminer l'emploi de toute autre

* Pour prouver ce fait de manière concluante, il faudrait exploiter une ou plusieurs centrales électronucléaires avec succès pendant 25 ou 30 années. Heureusement certaines des grandes entreprises productrices d'électricité pourront accepter comme preuve suffisante des extrapolations fondées sur une dizaine d'années d'expérience acquise avec de nombreux types de génératrices nucléaires.

Tableau 2

Coût évalué en millièmes de dollar par kilowattheure [a]

	Centrale thermique utilisant le charbon, le pétrole ou le gaz	Centrale hydraulique	Centrale atomique
Dépenses de production [b]			
Combustible	1,03 - 4,17	0,00 - 0,00	0,50 - 1,50
Main-d'œuvre	0,11 - 0,48	0,04 - 0,20	0,15 - 0,50
Entretien	0,10 - 0,30	0,03 - 0,22	0,20 - 0,45
Surveillance	0,02 - 0,08	0,01 - 0,10	0,05 - 0,15
Fournitures diverses, etc.	0,02 - 0,14	0,02 - 0,10	0,10 - 0,30
TOTAL	1,28 - 5,17	0,10 - 0,62	1,00 - 2,90
Frais fixes [c]			
Intérêts [d]	0,69 - 1,03	0,86 - 2,28	1,14 - 2,86
Amortissement [e]	0,43 - 0,72	0,31 - 0,84	1,00 - 2,50
Impôts, assurances, etc. [f]	0,51 - 0,78	0,12 - 0,32	0,86 - 2,15
TOTAL [g]	1,63 - 2,53	1,29 - 3,44	3,00 - 7,51
Coût total	2,91 - 7,70	1,39 - 4,06	4,00 - 10,41

[a] Pour une centrale hypothétique de 200 000 kW exploitée avec un coefficient aux bornes de 80 pour cent.

[b] Les dépenses de production pour les centrales thermiques conventionnelles et pour les centrales hydrauliques ont été estimées à partir : *a*) de données fournies par les services publics canadiens, et *b*) des comptes détaillés et des rapports publiés par la Commission fédérale de l'énergie des États-Unis d'Amérique.

[c] Aux fins de comparaison, on a supposé que le financement était toujours assuré par le Gouvernement.

[d] On a supposé que l'intérêt était de 4 pour cent par an.

[e] L'amortissement a été calculé sur une base linéaire de : 1,5 pour cent pour les centrales hydrauliques; 2,5 pour cent pour les centrales utilisant le charbon, le pétrole et le gaz et 3,5 pour cent pour les centrales atomiques.

[f] Dans le cas des centrales thermiques utilisant des combustibles classiques et des combustibles nucléaires, les impôts sur la propriété ont été calculés à 2 pour cent, et les assurances à 1 pour cent du capital. Pour les centrales hydrauliques, ces chiffres sont respectivement de 0,5 pour cent et de 0,12 pour cent. On a, dans ce dernier cas, tenu compte d'une redevance pour le loyer de l'eau.

[g] Les coûts totaux en capital dans le cas d'une centrale atomique ont été supposés varier de 200 à 500 dollars par kilowatt installé. Pour les autres centrales thermiques, de 120 à 180 dollars par kilowatt, et pour les centrales hydrauliques de 150 à 400 dollars par kilowatt.

source d'électricité. Dans d'autres régions, les combustibles peuvent être beaucoup plus cher. Pour supporter les frais de transport, le prix imposé peut être doublé ou triplé. C'est dans des cas comme celui-ci que le coefficient d'utilisation du combustible présente une très grande importance et c'est dans ces circonstances également que l'énergie nucléaire présentera le plus grand avantage.

Les chiffres qui ont trait à l'énergie atomique sont des prévisions qui relèvent encore plus de l'estimation. Ils ne sont pas du tout définitifs et on les indique simplement pour montrer une gamme de possibilités. La limite supérieure, c'est-à-dire 10 millièmes de dollar par kilowattheure, pourrait peut-être être obtenue par de grandes centrales nucléaires construites au cours des deux ou trois années à venir sur la base de l'expérience que nous possédons déjà. Le chiffre beaucoup plus bas de 4 millièmes de dollar par kilowattheure est surtout un idéal à atteindre. Il indique un but, un niveau de coût qu'il sera possible d'atteindre après des années de progrès nouveaux. Il semble improbable que l'on puisse démontrer avant 1965 s'il sera possible d'abaisser le coût de l'énergie nucléaire au-dessous de 5 millièmes de dollar.

Nous avons indiqué une gamme probable de coûts. Toutefois, l'énergie nucléaire ne sera pas concurrentielle dans toute les parties du Canada avant que son prix ne soit tombé en dessous de 8 millièmes de dollar par kilowattheure. A 7 millièmes de dollar, elle pourrait entrer en concurrence avec l'énergie hydraulique ou celle des centrales thermiques utilisant le charbon. Toutefois, ces demandes seraient limitées, mais à 6 millièmes de dollar la situation est différente. La région très industrialisée consommatrice d'énergie du sud de l'Ontario où bientôt on ne pourra utiliser d'autre combustible que le charbon, pourrait absorber d'importante

tranches d'énergie dans cette gamme de coûts sans créer un excédent, même temporaire, de puissance de production.

La question qu'il nous faut nous poser ensuite est : « Quand sera-t-il possible d'abaisser les coûts à tel point qu'ils puissent présenter de l'intérêt pour les producteurs au Canada? » Avons-nous des faits qui pourraient nous amener à croire que l'on pourra construire dans les dix années à venir des usines capables de parvenir à de tels prix ? Les diverses études sur la construction mécanique et l'économie auxquelles on se livre à Chalk River laissent entendre qu'il en est ainsi.

LES ÉLÉMENTS DU COÛT DE L'ÉNERGIE ÉLECTRONUCLÉAIRE

A l'époque actuelle où l'on ne produit aucune électricité à partir de l'énergie nucléaire au Canada, les estimations doivent être présentées et interprétées avec prudence. La méthode la plus utile est de partir du coût des éléments constituants. Examinons tout d'abord les frais de production et en particulier les frais du combustible. En 1951, un certain nombre de barres de métal d'uranium naturel dans la pile NRX avaient fourni une énergie thermique représentant par tonne de métal 3 000 mégawatts-jour sans nouveau traitement chimique. A l'avenir, si ce rendement est obtenu dans une génératrice nucléaire, et si l'uranium métal peut être assemblé dans les barres de combustible à un coût total de 44 dollars le kilogramme, alors, même avec le faible rendement de 22 pour cent pour la conversion d'énergie thermique en énergie électrique, la part des frais de combustible dans le coût de l'énergie électrique n'est seulement que de $\frac{44}{24\,000 \times 3 \times 0{,}22}$ dollar par kilowattheure = 2,78 millièmes de dollar par kilowattheure, qui est plus faible que le coût des combustibles de certaines grandes centrales thermiques brûlant du charbon, actuellement en exploitation.

Il est à espérer que l'on pourra obtenir un coût du combustible encore plus faible, et il vaut peut-être la peine d'examiner les raisons qui justifient ces espérances. On avait craint que les produits de fission ne fussent pas sûrement retenus dans le métal à ce niveau d'irradiation. Les isotopes de krypton et de xénon stables et à longue vie qui résultent de la fission s'élèvent à environ 0,22 atome par fission. Lorsqu'il s'agit d'uranium métal à irradiation de 3 000 mégawatts-jour par tonne, ce qui représente une fission de 3 gr par kg, les gaz de ces produits de la fission à température et pression normales occuperaient un volume dépassant de 20 pour cent celui du métal. Néanmoins, on a constaté que ces gaz étaient bien retenus. Il est probable toutefois qu'on ne pourra pas les retenir à des températures plus élevées. Dans une génératrice nucléaire, la température minimum du métal sera plus élevée que dans la pile NRX mais la température maximum ne sera peut-être pas nécessairement plus élevée dans la NRX où elle est maintenue juste en dessous de 600 °C, c'est-à-dire en dessous de la température de transition de la phase α à la phase β de l'uranium. L'expérience acquise depuis 1951 tend à confirmer que la retenue assurée des produits de fission dans le métal peut être obtenue même avec une irradiation plus élevée et il ne semble pas déraisonnable d'espérer retenir les produits au moins jusqu'à une irradiation de 5 000 mégawatts-jour par tonne.

Nous nous sommes surtout intéressés jusqu'ici aux piles ralenties à l'eau lourde avec refroidissement à l'eau ordinaire ou à l'eau lourde. Comme l'uranium réagit chimiquement à l'eau, il est nécessaire de gainer le métal, et l'on envisage d'utiliser pour cela l'aluminium ou le zirconium. Si une gaine de protection se rompt, on ne pense pas qu'elle sera réparée et la barre de combustible devra être déchargée. De tels incidents augmenteraient donc le coût des combustibles et il est très difficile d'en évaluer le risque. Nous supposerons qu'on peut le maintenir à moins de 10 pour cent. Nous avons une expérience suffisante de ces incidents qui se produisent, même en eau chaude, et sous irradiation, pour être sûrs que le nettoyage de la pile est réalisable et n'est pas trop coûteux.

Les cycles du combustible avec nouveau traitement chimique sont examinés dans un autre mémoire présenté à la Conférence. Nous concluons qu'avec les progrès prévus de la technologie chimique, les coûts du combustible avec nouveau traitement chimique seront plus faibles que ceux que l'on pourrait obtenir autrement. Il peut toutefois être difficile d'arriver à des coûts bien inférieurs à 0,75 millième de dollar par kilowattheure. Les frais de combustible tomberont donc, semble-t-il, au cours des dix années à venir d'environ 2 millièmes de dollar par kilowattheure. Le rendement de l'énergie de fission, ou la consommation d'une quantité initiale d'uranium naturel augmentera donc du chiffre de 0,4 pour cent (4 000 mégawatts-jour par tonne) maintenant réalisable sans nouveau traitement chimique, à environ 3 pour cent ou même davantage.

Si nous limitons nos considérations aux piles refroidies et ralenties à l'eau lourde, nous pouvons écarter les difficultés qu'il y aurait à atteindre des économies de neutrons suffisantes pour supprimer les effets délétères des produits de fission même pendant les longues irradiations proposées. Toutefois, cela ajoute un poste important aux investissements en capital, à savoir le coût de l'eau lourde. Mais si l'on suppose que les techniques de récupération de l'eau lourde (des fuites et autres échappements qui se passeront pendant l'exploitation de la pile) permettent un taux de perte qui ne soit pas plus élevé que celui constaté pour la pile NRX, on n'aura pas besoin d'amortir rapidement cet investissement de capital et les charges annuelles, bien qu'importantes, seront acceptables. Dans le mémoire présenté à cette Conférence sur les cycles de com-

bustibles, on a indiqué certaines comparaisons de coûts avec l'eau ordinaire. Si on peut se procurer de l'eau lourde pour un prix allant de 66 dollars à 88 dollars le kilogramme, son emploi semble économiquement acceptable.

Bien que le combustible représente le plus important des frais variables, ce n'est qu'un de ces frais; parlons des autres. Au début de la mise en valeur de l'énergie, nous pensons qu'il faut prévoir pour la main-d'œuvre une marge plus élevée d'un tiers que le coût correspondant dans l'exploitation des centrales thermiques utilisant le charbon, le pétrole ou le gaz. Comme il faudra prendre des précautions supplémentaires, les frais de réparation et d'entretien seront peut-être plus élevés. Au début, ils peuvent être doubles de ceux que l'on enregistre pour les centrales thermiques plus classiques. Les fournitures spéciales coûteront également davantage. La nécessité de compenser les pertes (quelque petites qu'elles puissent être en volume) de matières premières aussi onéreuses que l'eau lourde peut être coûteuse. Somme toute, ces diverses dépenses de production peuvent être arrondies au chiffre de 1 millième de dollar par kilowattheure.

Venons-en maintenant à une estimation des frais fixes. Quels sont les coûts que nous aurons à payer pour la construction et l'équipement de nos premières centrales nucléaires? Dans quelle mesure pouvons-nous espérer les réduire au cours des dix années à venir?

D'après le tableau 2, la gamme des frais fixes pour les centrales nucléaires s'établissait entre 3 et 7,51 millièmes de dollar par kilowattheure alors que, pour les centrales thermiques utilisant le charbon, le pétrole ou le gaz, cette gamme n'était que de 1,63 à 2,53 millièmes de dollar par kilowattheure. On peut considérer pour une évaluation qu'une importante partie de l'usine thermique, à savoir les turbines et les générateurs, se retrouve dans la centrale nucléaire, si l'on part de l'hypothèse que le coefficient aux bornes est de 80 pour cent dans les deux cas. Cet élément peut représenter de 60 dollars à 90 dollars par kilowatt installé et représentera donc de 0,82 à 1,22 millième de dollar par kilowattheure suivant les mêmes hypothèses que pour les usines utilisant du charbon. Si l'on soustrait ceci des frais de la centrale nucléaire, on garde la gamme de 2,18 à 6,29 millièmes de dollar par kilowatt pour les frais fixes provenant de la construction de la pile et des installations auxiliaires de la centrale nucléaire. Si l'on convertit ceux-ci au taux de 10,5 pour cent, ce qui représente de 145 dollars à 420 dollars par kilowatt installé pour la pile et les installations auxiliaires, on obtient pour une centrale de 200 000 kilowatts un montant de 29 millions à 84 millions de dollars.

Jusqu'ici, nous ne disposons que d'une estimation approximative pour une pile nucléaire de démonstration de 20 mégawatts, à savoir 7 500 000 dollars. Si l'on extrapole ce chiffre pour une centrale de 200 MW, il ne convient pas de multiplier par 10 et il semble donc que l'estimation se placerait dans la tranche inférieure de l'ordre de grandeur mentionné ci-dessus, à savoir 29 millions à 84 millions de dollars. Il faut qu'elle soit inférieure à 45 millions de dollars pour que le coût maximum de l'énergie nucléaire tombe en dessous de 7 millièmes de dollar par kilowattheure.

Nous n'avons pas tenu compte d'une baisse future du prix de l'uranium naturel, ni de l'eau lourde. Nous n'avons pas prévu non plus les nombreuses économies dans la construction que permettra l'expérience acquise dans la construction et l'exploitation des premières piles thermiques. Pour cette raison, un chiffre de 250 dollars par kilowatt installé ne semble pas improbable vers 1965. En d'autres termes, nous avons bon espoir de ramener les frais fixes à environ 4,5 millièmes de dollar par kilowattheure, et cela dans les dix années qui vont suivre.

Si nous totalisons nos frais variables, que l'on peut estimer à environ 2 millièmes de dollar, et nos frais fixes plus importants qui s'approcheraient de 5 millièmes de dollar, nous obtenons un coût total moyen pour l'énergie nucléaire d'environ 7 millièmes de dollar par kilowattheure. Des centrales atomiques ayant un coefficient de rendement encore supérieur seront peut-être en construction au Canada avant 1965.

LES PRÉVISIONS DU RÔLE DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

En ce qui concerne le Canada, ceci ouvre toute une gamme de possibilités. De grandes centrales de 100 000 kilowatts d'énergie à 6 millièmes de dollar seront un avantage certain dans plusieurs au moins des principales régions consommatrices d'énergie électrique du Canada. Non seulement elles viendront compléter les ressources existantes, mais on pourra y avoir recours de plus en plus entre 1970 et 1990 pour faire face aux besoins croissants de la charge de base des services publics des régions avoisinantes.

Le rôle joué par l'énergie nucléaire dépendra essentiellement de la durée qu'il faudra pour que l'industrie abaisse ses prix. Nous avons déjà certaines indications qui nous permettront d'estimer à quel niveau nous serons peu avant 1970. A partir de cette date, nos progrès relèvent beaucoup plus du domaine de l'hypothèse. Les premiers réseaux d'énergie atomique, s'ils peuvent être plus sûrs au début, n'offrent pas nécessairement les meilleures perspectives à long terme pour une diminution des coûts de l'énergie. D'autres réseaux plus compliqués qui prendront chaque fois plus de temps à mettre au point pourront peut-être l'emporter en fin de compte.

Ceci étant, on estime généralement que nous pouvons envisager trois phases dans la période de transition qui nous mènera à l'énergie nucléaire. Pendant la première période ou phase de début, on construira plusieurs grandes usines surtout à titre

d'expérience. Le Gouvernement devra apporter son aide sous forme de subventions pour la recherche et la construction. On demandera, à l'industrie de l'énergie et à l'industrie privée, de prendre à leur charge la plus grande partie des biens d'équipement et des frais d'exploitation.

Pendant la deuxième phase ou phase intermédiaire, la confiance dans les avantages que présente à longue échéance l'énergie nucléaire, fera que l'industrie privée sera prête à prendre à sa charge la plupart des frais, sinon tous. Puis, un nombre croissant des nouvelles centrales thermiques en construction au Canada seront du type nucléaire. Ceci, d'après nos calculs, devrait commencer à se produire entre 1960 et 1970. Après cela, nous entrerons dans la troisième phase. La proportion des centrales nucléaires par rapport aux autres centrales thermiques sera de l'ordre de un à un; cela marque le début d'une ère entièrement nouvelle où l'énergie électronucléaire deviendra une des principales sinon la principale source d'électricité du Canada.

PRÉVISION DE LA DEMANDE

On peut évaluer de deux manières la demande future d'énergie. On peut dire qu'une méthode est cumulative et repose essentiellement sur des données historiques. L'autre pourrait être appelée analytique. Si elle part de projections de la consommation dans les diverses catégories d'utilisation, ces projections tiennent néanmoins compte de modifications prévues dans le monde entier. Totalisée d'abord par l'industrie, puis par région, cette autre méthode devrait donner plus de détails sur l'avenir de l'industrie.

Les résultats de la première méthode sont moins certains et lorsqu'ils sont extrapolés à partir d'une période prospère ils peuvent être exagérément élevés. Les résultats de la deuxième méthode qui sont plus étroitement liés à des situations connues pourraient être exagérément prudents. De plus, si on les considère comme les limites supérieure et inférieure d'une gamme de possibilités, ils prennent une signification nouvelle. Tout est possible dans cette gamme croissante de consommation, et c'est avec cette pensée à l'esprit que nous avons tenté d'évaluer ce que nous considérons comme la contribution vraisemblable de l'énergie électronucléaire aux besoins futurs en énergie du Canada.

En utilisant une méthode purement statistique, on peut projeter les tendances passées dans l'avenir. De cette manière, nous arrivons à un taux annuel moyen d'augmentation de la demande totale d'énergie électrique au Canada de l'ordre de 6 pour cent. On peut s'attendre que la consommation doublant tous les douze ans soit multipliée par quatre pendant les vingt-cinq années à venir.

En utilisant la méthode plus détaillée pour chaque industrie et pour chaque région, nous arrivons à un taux général d'augmentation qui tend à diminuer pendant les trente années à venir. On s'attend que les besoins du pays en énergie électrique ne feront guère plus que tripler entre aujourd'hui et 1980. Le tableau 3 illustre le taux annuel d'augmentation qui est prévu par intervalles de cinq ans pendant les vingt-cinq années à venir, en utilisant pour cela cette méthode plus satisfaisante pour estimer les besoins du Canada en énergie :

Tableau 3

Taux annuel d'augmentation

Période	Pourcentage
1956-1960.	5,5
1961-1965.	5,0
1966-1970.	4,6
1971-1975.	4,3
1976-1980.	4,0

La méthode cumulative et statistique qui indique une augmentation composée de 6 pour cent par an de la demande d'électricité se justifie du point de vue économique. La population du Canada continue à augmenter à un taux moyen annuel d'environ 2 pour cent. La productivité industrielle mesurée par habitant augmente également sur une longue période d'années à un taux qui est tout proche de 2 pour cent par an. Le revenu réel disponible s'accroît à un taux d'environ 4 pour cent. Si, en outre, nous prenons une marge de 2 pour cent pour tenir compte du fait que le prix de l'électricité ne montera pas autant que celui des autres produits, il ne semble pas déraisonnable d'estimer que l'augmentation annuelle générale restera aux environs de 6 pour cent. Par contraste, on peut considérer que 4 pour cent serait nettement faible. Même 5 pour cent pourrait résulter en une sous-estimation de la demande, du moins à brève échéance.

La plupart des analystes du marché ont tendance, ce qui est compréhensible, à préférer l'autre méthode de raisonnement. Ils préfèrent mettre leur foi en une évaluation des tendances composantes. Les besoins futurs d'énergie électrique, à leur avis, sont le résultat d'autres facteurs économiques dont un grand nombre peuvent être évalués sans référence directe à l'industrie de l'énergie électrique en tant que telle. Ajoutant ça et là une marge pour tenir compte de divers faits que l'on ne peut que vaguement prévoir, ils concluent que l'augmentation de la demande d'électricité au Canada peut ne pas être tout à fait aussi rapide, particulièrement sur une longue période d'années.

Il semble important de reconnaître la structure changeante du développement industriel du pays parce qu'aujourd'hui au Canada deux ou trois industries consomment plus de la moitié de l'énergie totale produite. L'analyse du marché pour ces industries présente donc une importance particulière. De plus, ces industries participent à la

tendance générale qui veut que l'on applique de plus en plus des méthodes chimiques pour le traitement des matières premières et des matières semi-manufacturées. Ceci est vrai non seulement du raffinage des métaux non ferreux mais aussi de la fabrication de la pâte à papier et des produits chimiques industriels.

De plus, au Canada, les ressources du pays en pétrole et en gaz naturel semblent devoir freiner l'emploi de l'énergie électrique pour la fabrication de vapeur et tout autre mode de chauffage.

Enfin, nous devons songer que de l'énergie nucléaire peu coûteuse, si elle devait devenir disponible en vingt ou trente ans, favoriserait l'implantation de certaines industries lourdes utilisatrices d'énergie, comme le raffinage des métaux légers, à proximité des principaux marchés industriels du monde. Dans ce cas, une grande partie de la demande, qui réclamerait au Canada une nouvelle augmentation de l'énergie, disparaîtrait. Ceci pourrait plus que compenser l'emploi de l'électricité pour le raffinage électrolytique de métaux nouveaux comme le titane et pour le traitement par des moyens électrométallurgiques ou électrochimiques d'autres ressources naturelles du pays. Ceci aura une incidence sur la mise en valeur d'un genre spécial d'énergie à très bon marché, à savoir l'important potentiel hydroélectrique qui existe à une certaine distance des autres centres de consommation d'énergie. En même temps, il convient de noter que la population du Canada, qui est un autre élément de la demande, continuera vraisemblablement à augmenter sa productivité et à utiliser, pour tous ces travaux, une quantité croissante d'énergie. Si donc l'on perd des marchés qui existent, on peut s'attendre à en trouver de nouveaux.

Compte tenu de toutes ces considérations, nous en sommes donc venus à la conclusion que le *taux d'accroissement* annuel de la consommation en pourcentage peut baisser. Il tombera du taux actuel de 6 pour cent à près de 4,5 pour cent après 1970. Les besoins totaux en énergie continueront néanmoins à augmenter. Il faudra donc encore prévoir des installations annuelles variant entre 1 million et 2 millions de kilowatts de 1960 à 1970.

Ayant ainsi évalué, de manière très générale, la demande cumulative que l'on devra satisfaire probablement dans ce pays, retournons une fois de plus au problème de l'approvisionnement. Nos études sur les coûts par région indiquent que l'énergie hydraulique restera la source principale d'énergie électrique du pays. Même en 1980, elle pourra constituer jusqu'aux deux tiers de la capacité installée de ce pays. Dans l'intervalle, la production thermique aura pris beaucoup d'importance. De proportions négligeables il y a quelques années, elle représentera au moins 30 pour cent de la puissance totale installée du Canada dans vingt-cinq ans. Si l'on exprime la production en millions de kilowatts, et si on la divise par catégories on peut dresser le tableau 4 *.

Ces chiffres indiquent que le rôle joué par l'énergie nucléaire, s'il doit être modeste dans les prochaines années, se développera sans doute rapidement. Nos calculs, établis d'après les coûts prévus que nous avons indiqués précédemment, montrent qu'il est possible qu'on installe plusieurs millions de kilowatts de puissance pendant les années qui suivront 1970. En 1980, les centrales nucléaires peuvent représenter jusqu'à 10 à 15 pour cent de la puissance totale de production de ce pays.

Cette prévision de la demande d'énergie nucléaire, si elle se réalise, aura d'importantes répercussions dans de nombreux secteurs de l'économie canadienne. Ne seront-elles pas au-dessus de nos forces? Si l'on examine les principaux besoins en matières premières, en usines et en équipement, qui naîtront de cette révolution de l'énergie thermique, il semble que l'on puisse voir apparaître de nombreuses possibilités, mais aussi quelques problèmes à résoudre.

* Pour faire ces estimations pour l'avenir, nos hypothèses sur le coût moyen de l'énergie nucléaire sont : 6 à 7 millièmes de dollar par kilowattheure peu avant 1970; 5 à 7 millièmes de dollar par kilowattheure de 1971 à 1975; de 5 à 6 millièmes de dollar par kilowattheure de 1976 à 1980, et 4 à 6 millièmes de dollar par kilowattheure par la suite.

Tableau 4

Puissance installée, en millions de kilowatts

Date	Total	Hydro	Autres		
			Total	Charbon, pétrole, gaz	Nucléaire
Décembre					
1951 . . .	11,1	10,0	1,1	1,1	néant
1956 . . .	16,0	14,0	2,0	2,0	néant
1961 . . .	22,5	20,0	2,5	2,4 - 2,3	0,1 - 0,2
1966 . . .	28,0	24,5	3,9	3,7 - 2,9	0,2 - 1,0
1971 . . .	34,0	27,4	6,6	6,0 - 4,9	0,6 - 1,7
1976 . . .	41,0	30,2	10,8	8,8 - 7,5	2,0 - 3,3
1981 . . .	48,0	33,0	15,0	11,0 - 8,0	4,0 - 7,0

Quant aux besoins en combustible nucléaire que nécessitera un tel programme, il n'y a guère de raison de s'alarmer. Même à supposer que le combustible naturel ne soit consumé qu'à raison de 3 pour cent, les besoins totaux du Canada, jusques et y compris 1980, ne dépasseront pas quelques milliers de tonnes. Il semble évident que l'industrie minière du pays devra chercher ailleurs un marché pour une grande partie de sa production de métal nouveau.

La situation en ce qui concerne l'eau lourde est encore un peu différente. Les tonnages nécessaires peuvent être très supérieurs à la capacité actuelle de production du pays. Il se peut donc qu'avec le temps il faille créer au Canada une industrie chimique fort importante pour satisfaire à la demande rapidement croissante de cette matière première.

On peut donc prévoir que les besoins cumulatifs en matières premières, divisés par tranches de cinq ans, d'un système utilisant l'uranium naturel réintroduit dans le circuit, soient à peu près ceux qui figurent au tableau 5.

Tableau 5

Système utilisant l'uranium naturel réintroduit dans le circuit. Besoins en puissance et en matières premières

Année	Puissance installée (MkW)	Stocks d'uranium naturel (tonnes)	Régénération annuelle d'uranium naturel (tonnes)	Stocks d'eau lourde (tonnes courtes) [a]
1961	0,1 - 0,2	60 - 120	4 - 8	100 - 200
1966	0,2 - 1,0	120 - 600	8 - 40	200 - 1 000
1971	0,6 - 1,7	360 - 1 020	24 - 68	600 - 1 700
1976	2,0 - 3,3	1 200 - 1 980	80 - 132	2 000 - 3 300
1981	4,0 - 7,0	2 400 - 4 200	160 - 280	4 000 - 7 000

[a] Une tonne courte équivaut à environ 907,18 kg.

Convertis en argent, ces investissements prennent un sens nouveau. La production d'uranium naturel pour la consommation du pays semblerait devoir s'élever à des dizaines de millions de dollars chaque année. Même si l'on découvre de nouvelles méthodes pour la fabrication d'eau lourde, qui en réduiront sensiblement le prix, ces dépenses pourraient atteindre un niveau annuel de 40 à 50 millions de dollars dans vingt-cinq ans. Et dépassant encore ces frais, il faut tenir compte des dépenses pour les génératrices, les machines et l'équipement. Ces investissements en capital pourraient atteindre 100 millions de dollars par an en 1980.

Ce sont là des chiffres très élevés et cependant il est surprenant de constater qu'ils ne sont pas très éloignés de ce qu'a coûté l'industrie de l'énergie électrique au Canada ces dernières années. Les dépenses annuelles des services publics pour la construction de génératrices et l'achat d'équipement sont actuellement de l'ordre de 250 millions de dollars. Dans vingt ans, leurs investissements en biens de capital pour des installations de tous genres peuvent se rapprocher de 500 millions de dollars. La construction et l'équipement d'un certain nombre de centrales nucléaires assurant la charge de base et la fourniture de combustible qui coûteraient

Tableau 6

Investissement possible en millions de dollars

Année	Stocks		Usine génératrice et équipement	Investissement total
	Uranium [a]	Eau lourde [b]		
1961	2,4 - 4,8	6,0 - 12	40,0 - 90	48,4 - 110
1966	4,8 - 24	12,0 - 60	70,0 - 450	86,8 - 540
1971	14,4 - 40,8	36,0 - 102	180,0 - 765	230,4 - 910
1976	48,0 - 79,2	120,0 - 198	500,0 - 1 500	668,0 - 1 760
1981	96,0 - 168	240,0 - 420	800,0 - 3 200	1 136,0 - 3 750

[a] A supposer que le coût de l'uranium métal soit de 44 dollars le kg.
[b] A supposer que le coût de l'eau lourde soit de 66 dollars le kg.

environ 150 millions de dollars chaque année, ne semblent donc pas devoir être freinés par un manque de ressources financières.

Dans un pays jeune comme le Canada, dont la population est faible et les ressources naturelles abondantes, il est indispensable, pour le progrès économique, que l'on puisse disposer d'une grande quantité d'énergie. L'énergie nucléaire qui peut devenir disponible en quantités presque illimitées, supprime automatiquement ce qui, dans des circonstances moins favorables, a été la limite supérieure de l'accroissement industriel du pays, mais cela demande un effort en raison des circonstances changeantes. Il semble que, dans une dizaine d'années, on pourra disposer d'énergie thermique à bon marché grâce à la fission nucléaire. Pour ce faire, il faut créer plusieurs industries nouvelles. Il faudra en développer d'autres et il faudra économiser et réinvestir d'importantes sommes d'argent. Heureusement, pour le peuple canadien, ceci n'est pas une expérience nouvelle pour lui et ne dépasse pas ses possibilités techniques et financières. Il semble donc que le peuple canadien puisse y parvenir sans difficultés.

Intégration de l'énergie nucléaire parmi les moyens de production de l'énergie en France

par P. Ailleret* et P. Taranger **

L'évolution de la situation énergétique de la France peut se résumer ainsi :

a) La consommation du charbon pour tous usages, y compris l'alimentation des centrales thermiques, a très peu varié depuis le début du siècle. Elle est de l'ordre de 70 millions de tonnes par an, et elle est assurée à raison de 55 millions de tonnes par an par la production des mines françaises.

b) La consommation de produits pétroliers est en accroissement rapide, lié principalement au développement des transports, comme dans l'ensemble du monde. La production française est encore très faible, mais les succès récents des recherches pétrolières en France permettent de penser qu'un développement important de production est possible, tant en gaz naturel qu'en pétrole, avec une incertitude pour le moment très grande sur les tonnages qui seront atteints.

c) La consommation d'énergie électrique progresse actuellement à une cadence de l'ordre de 7 à 8 pour cent par an, soit sensiblement au taux du doublement tous les dix ans. Il paraît très probable que cette tendance se poursuivra pendant longtemps. D'ailleurs, la consommation moyenne par habitant n'est encore en France que de 1 050 kilowattheures par an, de sorte que toute crainte de saturation paraît repoussée très loin du fait que des pays ayant atteint des consommations par habitant trois ou quatre fois plus élevées ne voient encore apparaître aucun signe de saturation.

Cette consommation électrique provient pour moitié environ de centrales hydrauliques et pour moitié de centrales thermiques.

La production hydroélectrique française est actuellement d'environ 25 milliards de kilowattheures en année hydraulique moyenne.

La limite des possibilités hydroélectriques françaises est difficile à préciser, car elle n'a de sens que pour un niveau de valeur déterminée de ces aménagements. C'est probablement seulement quand on voudra dépasser 60 ou 70 milliards de kilowattheures par an que les coûts monteront substantiellement du fait qu'il faudra alors accepter des chutes moins favorables, soit du point de vue des dispositions locales, soit au point de vue de la nature géologique.

Dans la phase actuelle, aucune diminution de la valeur des aménagements que l'on réalise ne peut encore être constatée. La sélection constante des sites considérés comme les meilleurs aurait dû faire apparaître une baisse de valeur des nouveaux sites, mais cette tendance a été compensée par l'amélioration progressive dans l'architecture rationnelle des aménagements.

D'autre part, des moyens techniques nouveaux améliorent encore les coûts unitaires des aménagements : les progrès dans la perforation des souterrains, les possibilités nouvelles ouvertes dans l'aménagement des basses chutes par la conception des turbines hydrauliques axiales en sont des exemples importants.

Néanmoins, la phase de renchérissement des équipements disponibles pourrait commencer dans une dizaine d'années si l'on continuait à faire face à la moitié des besoins nouveaux d'électricité avec des aménagements hydroélectriques (en fait, ce pourcentage est un peu plus faible dans la dernière tranche d'équipements).

En tout cas, dans une vingtaine d'années, on arriverait à des prix qui seraient prohibitifs par rapport au coût de l'énergie thermique dans l'hypothèse où les combustibles classiques resteraient au même prix.

A cette époque, à défaut d'une source d'énergie naturelle, l'énergie thermique ne devrait pas seulement prendre la même part qu'autrefois dans les besoins nouveaux de la consommation mais elle devrait aussi relayer l'hydraulique.

Heureusement, la croissance des calories nécessaires n'est pas proportionnelle aux besoins d'énergie thermique : d'une part, les rendements continuent à s'améliorer. Les températures ont monté assez régulièrement depuis le début du siècle à une cadence moyenne de 7 °C par an et on aurait pu penser que cette progression deviendrait de plus en plus difficile. En fait, les températures continuent

* Membre du Comité de l'énergie atomique, Directeur général des études et recherches de l'Électricité de France.

** Directeur industriel au Commissariat à l'énergie atomique.

à monter rapidement. Bien entendu les rendements thermodynamiques ont une croissance de plus en plus lente mais les chiffres de calories par kilowattheure continuent à baisser substantiellement dans les installations nouvelles.

Il faut tenir compte, d'autre part, de ce que le rendement moyen est encore très inférieur au rendement des unités les plus modernes. Le rajeunissement du parc de centrales ne résulte que d'une lente progression. Ainsi le rendement moyen continuerait à monter même si la technique des groupes nouveaux se stabilisait, ce qui n'est pas le cas.

Au total, les prévisions de consommation de calories faites en France montrent qu'un quadruplement de la production d'énergie thermique entraînerait un triplement des calories nécessaires sous forme de charbon ou de fuel. A cet ordre de grandeur du développement des besoins de calories dans les vingt années à venir, il faudra vers la fin de cette période commencer à ajouter un supplément correspondant à la relève progressive de l'hydraulique.

A l'heure actuelle, la production thermique d'énergie électrique française se fait essentiellement à base de charbon. Mais la production des mines françaises est très peu souple et paraît devoir plafonner autour de 55 millions de tonnes par an. Sans doute, la réduction progressive des consommations de charbon des chemins de fer et du chauffage domestique compensera une partie de la croissance des besoins des centrales. La réduction de consommation du charbon pour les locomotives est d'ailleurs due en France, moins à la « dieselisation » qu'à l'électrification des chemins de fer qui se poursuit à la cadence d'environ 200 kilomètres par an, stimulée par le succès de mise au point de la traction à 50 périodes. Néanmoins, ces compensations ne seront que partielles et le besoin de calories supplémentaires ne pourrait être satisfait que par l'importation, à moins d'un très grand développement de la production pétrolière sur le territoire français, qu'il serait encore prématuré d'escompter aussi ample.

Ainsi, le développement exponentiel probable des besoins d'énergie électrique justifierait-il une sérieuse inquiétude d'avenir si les moyens classiques étaient seuls à envisager. Sans doute, une certaine rallonge de l'énergie hydraulique est-elle encore possible en France où des conditions naturelles particulièrement favorables peuvent permettre d'utiliser dans la baie du Mont-Saint-Michel des marées d'une amplitude exceptionnelle (12,6 m en marée de vives-eaux moyenne). Mais il ne s'agit là que d'une rallonge à l'échelle de 15 à 20 milliards de kilowattheures par an, qui ne ferait que retarder les difficultés de quelques années.

C'est pourquoi la France est très particulièrement intéressée par l'énergie atomique qui paraît devoir apporter en temps utile la relève à l'hydraulique et limiter un développement des besoins de calories auxquels les ressources naturelles de la France en combustible classique ne permettraient vraisemblablement pas de faire face.

Alors que les prix de l'énergie hydraulique monteront progressivement en France dans quelques années et que la production thermique posera des problèmes de disponibilités de calories, le prix de revient de l'énergie atomique va se préciser et baisser probablement assez vite.

A partir du moment où les courbes du prix de revient se recouperont, il y aura intérêt à faire un développement quantitatif massif des centrales nucléaires. Pour être en état de le faire, il est nécessaire d'avoir réalisé déjà un développement à assez grande échelle de ces centrales, avant même que la rentabilité n'en soit assurée.

C'est donc progressivement qu'elles s'intégreront dans les moyens de production français et cette progressivité cadre précisément assez bien avec la croissance lente de la difficulté de produire en France de l'énergie classique en quantité suffisante.

Les centrales nucléaires débiteront sur le réseau général d'interconnexion français, en parallèle avec les centrales thermiques et hydrauliques et leur exploitation sera déterminée par la recherche d'un optimum économique d'ensemble, tout comme c'est le cas actuellement pour la conjugaison entre centrales thermiques, centrales hydrauliques au fil de l'eau et centrales hydrauliques à réservoir.

Les premières piles à uranium naturel et à graphite qui sont en construction et en projet devront évidemment fonctionner d'une manière aussi permanente que leurs conditions techniques de marche le permettront. Toutes les dispositions ont été prises pour que le déchargement et le rechargement des barres d'uranium puissent être faits en marche; le recuit du graphite sera seul, en principe, à impliquer des arrêts; on peut penser que ces centrales pourront atteindre une grande utilisation annuelle à une puissance sensiblement constante.

Il y aura un double intérêt à les maintenir constamment à pleine charge : d'une part, un très grand prix s'attache à avoir le plus tôt possible de l'information sur les durées de vie des différents éléments de la pile; d'autre part, la production du plutonium est importante du point de vue du programme ultérieur de piles enrichies et de « breeders ». Une fois la pile construite, l'aspect information et l'aspect plutonium suffisent à justifier économiquement la marche de la pile, même si son énergie n'avait pas de valeur, par exemple dans les nuits de périodes de hautes eaux, quand des centrales hydrauliques déverseraient dans la même région, ou en cas de panne du groupe turbo-alternateur alimenté par la pile. C'est pourquoi des dispositions qui n'ont encore jamais eu à être envisagées dans des centrales classiques ont été prévues pour pouvoir shunter la turbine et maintenir en fonctionnement la pile et les turbines à vapeur de ses soufflantes, sans que le groupe turbo-alternateur ait à fonctionner.

Une telle marche forcée des piles est à prévoir pendant un certain nombre d'années, et l'intégration dans le réseau de cette puissance constante ne fera pas de difficulté tant que la puissance des centrales nucléaires restera faible par rapport aux puissances appelées par la consommation.

Mais il peut être intéressant de noter qu'il n'en sera pas toujours ainsi. Un jour viendra où le fonctionnement de la pile ne sera pas justifié seulement par l'information et le plutonium produits, mais où, en l'absence de besoins de kilowattheures, on préférera ralentir ou arrêter la pile pour éviter la dépense de combustible nucléaire et le vieillissement des matériaux de structure.

A ce moment, les centrales nucléaires cesseront d'être mises systématiquement à la base du diagramme, et on aura à chercher la meilleure répartition des puissances entre les différents types de centrales.

Dans le coût du kilowattheure marginal tiré d'une pile interviendra ainsi, à côté du coût du combustible, la dépréciation de la pile du fait de sa marche, et ceci posera un problème nouveau en matière de centrales. En effet, dans les centrales classiques, il est couramment admis que la durée de vie des chaudières et des groupes ne dépend pas de leur temps de service, mais seulement de leur âge, les vieillissements étant à peu près les mêmes dans les périodes d'arrêt que dans les périodes de marche. Ainsi la dépréciation est-elle portée tout entière à la charge de la garantie de puissance, sans entrer dans le prix de revient marginal des kilowattheures effectivement produits. Il est probable qu'il n'en sera pas de même dans les piles et qu'une partie notable des dépréciations sera liée non pas à l'âge mais au temps de marche à plein flux et à pleine température.

Toute fourniture de kilowattheures impliquera une certaine consommation de vie de la pile. Une partie des charges d'amortissement sera donc à renter, non pas par une annuité constante liée à la puissance garantie, mais par une charge proportionnelle aux kilowattheures produits.

Ceci réagira non seulement sur la conjugaison des exploitations des centrales nucléaires avec les centrales classiques, mais même sur la répartition des charges entre les différentes unités nucléaires elles-mêmes : si la fin de la vie d'une pile est en perspective par suite des effets des rayonnements, il y aura intérêt à économiser de la vie de cette pile en ne l'utilisant qu'à la pointe du diagramme de charge, de manière à conserver plus longtemps sa valeur d'usage au titre de la garantie de puissance.

Par exemple, si deux piles ont le même coût d'exploitation au point de vue des dépenses de fonctionnement et de combustible, il n'est pas indifférent, comme ce serait le cas pour une centrale classique, de faire marcher l'une ou l'autre; il faut éviter de faire marcher celle qui a déjà consommé le plus de vie dans les marches antérieures à grande puissance, de manière à tendre à égaliser leurs vies. C'est ainsi que l'on obtiendra un maximum pour la somme des valeurs d'usage en garantie de ces piles pendant les années qui suivront.

La répartition entre les centrales nucléaires et les autres sera naturellement aussi à adapter au fait qu'il y aura également intérêt à ne faire varier ni trop souvent, ni trop vite, les régimes de marche pour éviter les fatigues inhérentes aux changements de régime.

Nous sommes encore assez loin de l'époque où cette préoccupation de la vie consommée par le rayonnement pourra intervenir dans la répartition des charges entre les différents types de centrales. Mais en prévision de cette époque, il pourra être intéressant de chercher dès maintenant à dégager de l'expérience des piles la part de dépréciation qui peut être liée seulement à l'âge et celle qui sera liée à la durée effective de marche en charge.

Rôle comparé de l'énergie nucléaire et des autres sources d'énergie

par J. M. Kay *

COMPARAISON ENTRE LES CENTRALES NUCLÉAIRES ET LES CENTRALES THERMIQUES DE TYPE CLASSIQUE

Il est à peu près certain que, durant les quelques années à venir, plusieurs types différents de piles nucléaires seront mis en service avec succès. Au Royaume-Uni, on considère que le type le plus prometteur est actuellement la pile avec ralentisseur en graphite et refroidissement au gaz. Toutefois, on étudie également d'autres genres de piles, comme par exemple la pile avec ralentisseur en eau sous pression, la pile à eau bouillante et la pile avec ralentisseur en graphite et à refroidissement au sodium.

Il serait prématuré de dire lequel de ces types sera adopté en fin de compte. Aux fins du présent document, toutefois, il paraît raisonnable de faire reposer nos estimations sur l'hypothèse suivante : au premier stade, on utilisera les piles avec ralentisseur en graphite, et refroidissement au gaz, et au second stade de l'évolution de l'énergie nucléaire, on aura recours soit à des modèles améliorés de ce type de base, soit à l'un ou l'autre des types indiqués ci-dessus, c'est-à-dire à des piles thermiques utilisant des liquides comme refroidisseurs et consommant du plutonium combiné soit à de l'uranium naturel, soit à de l'uranium ayant déjà servi. L'idée d'un tel programme en deux temps est d'une importance fondamentale pour l'exploitation extensive de l'énergie nucléaire.

Si nous regardons plus avant dans le futur, nous pouvons supposer que d'autres types de piles atomiques seront mis au point pour la régénération des matières fissiles. La pile à neutrons rapides utilisant le plutonium comme combustible et la pile homogène aqueuse utilisant le thorium offrent des possibilités dans ce domaine.

Le gouvernement du Royaume-Uni dans son livre blanc (Cmd 9389) a donné quelques indications sur les dépenses en capital entraînées par la construction d'une usine nucléaire. Le coût du kilowatt installé dépendra du type de pile utilisé et de la dimension de l'unité. Toutefois, pour permettre la comparaison avec les centrales thermiques de type classique, on a pris pour le coût en capital d'une centrale nucléaire trois chiffres caractéristiques qui rendent bien compte des divers types qui seront probablement mis en service pendant les prochaines années. Les trois courbes indiquées pour les centrales nucléaires sur les figures 1 et 2 correspondent à ces divers coûts en capital. S'il se peut que le coût des premières centrales s'inscrive au sommet de la courbe, il y a tout lieu de croire que ce coût baissera progressivement au fur et à mesure que la construction s'améliorera.

On croit communément que les dépenses en combustibles seront négligeables pour les centrales nucléaires. Or, elles risquent au contraire d'être appréciables si les conditions suivantes ne sont pas remplies :

a) Il faut obtenir un degré d'irradiation très élevé des éléments combustibles;

b) Il faut séparer le plutonium pour l'utiliser comme combustible dans d'autres piles; la valeur du plutonium peut alors être portée au crédit de l'exploitation.

Compte tenu de l'intérêt du capital et des dépenses en combustible et des frais d'exploitation, y compris l'actif représenté par le plutonium en tant que sous-produit, il est possible de tracer le coût net estimatif de la production de force à partir de l'énergie nucléaire au moyen des courbes des figures 1 et 2. La figure 1 montre *le coût du kilowattheure* distribué. La figure 2 donne le *coût annuel par kilowatt de demande maximum.* Dans chaque cas, le coût est porté en regard du taux d'utilisation annuel. On a également porté sur ces deux figures le coût correspondant de la production d'électricité dans une centrale thermique de type classique utilisant du charbon à 3, 4 et 5 livres sterling la tonne. Il convient de souligner que la comparaison indiquée sur les figures 1 et 2 est qualitative plutôt que quantitative. On ne peut donner d'estimation précise du coût de production de l'électricité que lorsque l'on connaît les dimensions de la centrale, les conditions locales et les dispositions prises pour l'approvisionnement en combustibles et leur manutention.

Original : anglais.

* Kennedy et Donkin, 12 Caxton Street, Londres, S.W. 1.

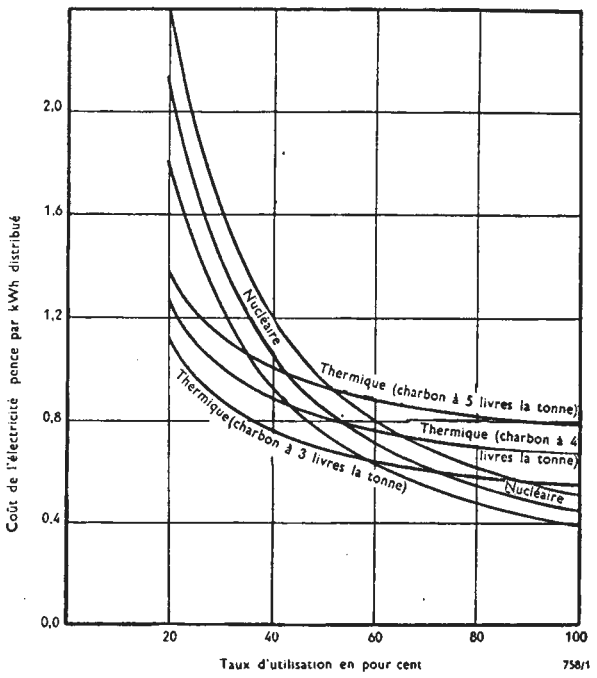


Figure 1. — Comparaison entre l'énergie nucléaire et l'énergie produite dans les centrales thermiques de type classique.

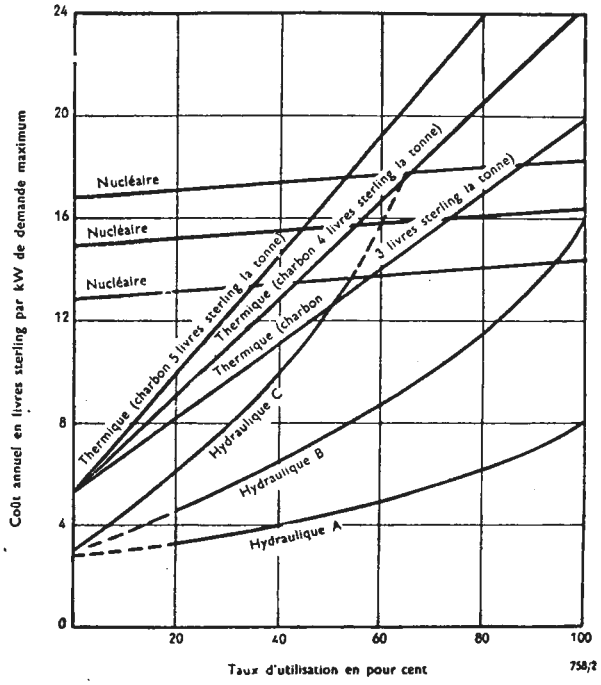


Figure 2. — Comparaison entre l'énergie nucléaire et l'énergie produite dans les centrales thermiques de type classique et les centrales hydrauliques.

On remarquera que, dans les conditions que nous avons supposées pour la première phase du développement de l'industrie atomique et pour un prix du charbon d'environ 4 livres sterling la tonne, l'énergie nucléaire pourra presque immédiatement soutenir la concurrence si le taux annuel d'utilisation atteint ou dépasse 60 %. On en conclut que l'application commerciale de l'énergie nucléaire aura lieu tout d'abord pour la production de la charge de base dans les pays qui ne disposent pas de quantités suffisantes de combustibles usuels bon marché. Ces premières centrales devront fonctionner avec un taux d'utilisation élevé, mais la réduction progressive des frais de construction et d'exploitation des centrales nucléaires provoquera un élargissement régulier du champ d'application de l'énergie nucléaire.

Le choix de l'emplacement des centrales nucléaires destinées à fournir la charge de base dépendra au premier chef des exigences de la sécurité et de l'approvisionnement en eau de refroidissement. Dans le cas des piles hétérogènes, l'élimination des matières radioactives ne devrait pas poser de problème si le fonctionnement est normal, mais il est préférable de prévoir des installations à cet effet, dans l'éventualité d'un accident. Si ces exigences sont satisfaites, le choix de l'emplacement sera déterminé normalement par la situation géographique du centre de consommation et le développement du réseau de transport existant. Le coût en capital du transport est presque entièrement fonction de la puissance à transporter et de la distance. Le coût d'exploitation du kilowatt transporté jusqu'à certaines limites diminue toutefois à mesure qu'augmente le volume des kilowatts à transporter. En conséquence, pour des taux d'utilisation élevés, le coût du transport en tant que pourcentage du coût total du kilowatt et du kilowatt-heure sera réduit. En d'autres termes, pour un faible taux d'utilisation, il est indispensable de produire l'énergie dans un lieu aussi proche que possible du lieu de consommation; mais la distance présente moins d'importance s'il s'agit de charges élevées.

COMPARAISON ENTRE LES CENTRALES NUCLÉAIRES ET LES CENTRALES HYDROÉLECTRIQUES

La comparaison entre l'énergie nucléaire et l'énergie hydroélectrique est beaucoup plus difficile parce que les modes d'utilisation de la houille blanche diffèrent grandement selon les différentes régions du monde. Il est particulièrement malaisé de comparer le coût en capital, qui dépend dans une large mesure de la topographie et du taux d'utilisation pour lequel la centrale hydroélectrique est conçue. Par exemple, une centrale qui a une production annuelle totale donnée, mais qui est conçue pour un taux d'utilisation très élevé, entraînera des dépenses plus grandes, du fait des travaux de génie civil nécessaires à la retenue d'un volume d'eau supplémentaire, par comparaison avec une centrale qui a une production annuelle identique,

mais qui sera conçue pour un taux d'utilisation plus faible ou moins rigide. Lorsque l'on porte le coût annuel du kilowatt installé en regard du taux d'utilisation, il faut donc, lorsqu'il s'agit d'énergie hydroélectrique, tenir compte d'une puissance installée variable pour les turbines et les groupes turbo-générateurs, alors même que l'on travaille sur un débit annuel et une production d'énergie fixes.

Au risque de simplifier à l'excès, on a indiqué à la figure 2 trois types représentatifs d'exploitation. La courbe A porte sur l'exploitation d'une grande centrale du type « au fil de l'eau, à faible hauteur de chute », comme on peut en trouver au Canada ou en Europe continentale. L'aplatissement de la courbe dépendra de l'uniformité du débit pendant les différentes saisons de l'année. Dans le cas des fleuves sortant des glaciers, il peut y avoir un fort écart saisonnier dans le débit et cela peut limiter le taux d'utilisation auquel la centrale peut fonctionner. Dans un cas de ce genre, l'énergie disponible serait considérablement réduite en hiver, mais on peut faire face à un taux d'utilisation annuel global plus élevé en ajoutant une accumulation par pompage pour tenir compte des variations saisonnières.

Les grandes centrales à faible hauteur de chute, telles que les représente la courbe A, peuvent fournir l'énergie la moins chère que l'on puisse trouver dans le monde, et l'énergie nucléaire ne peut entrer en concurrence avec des centrales de ce type. Les pays qui ont la chance d'avoir des caractéristiques géographiques favorables avec d'abondantes ressources en énergie hydroélectrique doivent exploiter au maximum ces ressources sans avoir à craindre la concurrence de l'énergie nucléaire dans un avenir prévisible.

La courbe B représente une grande centrale hydraulique construite avec bassin de retenue en terrain favorable. Cette courbe est moins aplatie que la courbe A parce que l'exploitation, si le taux d'utilisation est élevé, exige une accumulation plus importante et, partant, des dépenses supérieures pour les travaux de génie civil. Toutefois, la production d'énergie par cette centrale peut encore soutenir la concurrence de celle des centrales thermiques, quel que soit le taux d'utilisation.

La courbe C se rapporte à des centrales hydrauliques à hauteur de chute moyenne et de dimensions plus restreintes, construites en terrains moins favorables. Les travaux de génie civil, réservoirs d'accumulation, galeries, etc., exigent dans ce cas des investissements considérables. On trouve des exploitations de ce type en Écosse, par exemple. Si ces centrales sont destinées à faire face à des charges élevées, le coût en capital du kilowatt installé pourra être prohibitif. Toutefois, en augmentant la puissance installée et en construisant ces centrales surtout pour faire face aux charges de pointe, il est possible de produire de l'énergie pour des taux d'utilisation moins élevés à des coûts sensiblement plus faibles que les coûts correspondants des centrales thermiques. Il est évident que l'énergie hydroélectrique ainsi produite est appelée à fournir la force pour les charges de pointe, en combinaison avec les centrales thermiques conçues pour les charges de base. L'énergie nucléaire rendra encore plus séduisant ce type de centrale hydraulique en raison des avantages relatifs que présentent les centrales nucléaires pour la production de la charge de base.

On peut dire en conclusion que l'énergie nucléaire entrera rarement en concurrence avec l'énergie hydroélectrique. Lorsqu'on dispose d'abondantes ressources en énergie hydroélectrique et que l'on peut installer des centrales des types A et B, cette énergie coûtera moins cher que toute autre forme d'énergie. Ce n'est que lorsque ces ressources hydroélectriques auront été pleinement exploitées qu'il faudra les utiliser pour un taux d'utilisation plus faible en combinaison avec des centrales nucléaires conçues pour les charges de base. Dans les régions où l'énergie hydroélectrique est moins abondante, il faut l'exploiter dès le début avec l'énergie nucléaire pour faire face à la demande de pointe.

MÉTHODES UTILISÉES POUR FAIRE FACE A LA CHARGE DE POINTE

Au début tout au moins, l'énergie nucléaire sera utilisée pour fournir la charge de base dans les régions où il est impossible de l'obtenir autrement à bon marché; mais il faudra recourir à quelque autre source d'énergie pour faire face à la demande de pointe. Nous avons déjà examiné l'emploi de l'énergie hydroélectrique pour un faible taux d'utilisation et l'importance relative de cette application augmentera sans aucun doute dans l'avenir.

A l'heure actuelle, la demande de pointe est satisfaite surtout par les centrales thermiques de construction ancienne dont les combustibles coûtent relativement cher. Au cours des années à venir, de nombreuses centrales thermiques de type classique, conçues pour la charge de base, perdront de leur importance et ne seront plus exploitées que pour satisfaire à la charge de pointe. Plus tard encore, il sera peut-être nécessaire de concevoir et de construire des centrales thermiques utilisant le charbon ou le pétrole, destinées spécialement à faire face à la demande de pointe, alors que, d'une manière générale, cette application n'aurait pas pu se justifier par le passé.

Mais il faudra peut-être prévoir des installations complémentaires pour aider à faire face à la demande de pointe et permettre aux centrales nucléaires d'être rentables pour une charge élevée. A cet effet, un système d'emmagasinement d'énergie présenterait de l'intérêt, puisqu'une telle méthode contribuerait non seulement à écrêter les pointes journalières et saisonnières, mais encore à combler certains creux; on pourrait ainsi utiliser une plus grande proportion de

la centrale à un taux d'utilisation élevé. L'énergie hydroélectrique accumulée par pompage est la seule méthode permettant aujourd'hui l'emmagasinement commercial d'un grand volume d'énergie. L'emmagasinement thermique ne semble pas être rentable actuellement; mais on étudie en ce moment de nouveaux moyens d'accumuler l'énergie, comme par exemple la « cellule Bacon », et ces méthodes pourront présenter de l'intérêt dans l'avenir.

On peut donc supposer que les centrales à accumulation par pompage joueront un grand rôle dans l'avenir, combinées avec l'énergie nucléaire, pour la fourniture d'énergie. Il faut toutefois disposer de conditions topographiques convenables. On doit construire deux réservoirs d'accumulation à des niveaux différents, et le réservoir inférieur doit être de grande capacité pour éviter tout changement appréciable de la chute dans le canal de fuite ou le tuyau d'aspiration. Il est préférable de situer la centrale à accumulation par pompage à proximité du centre de consommation ou à portée d'un réseau d'interconnexion de grande capacité. Diverses installations mécaniques et hydrauliques sont possibles. On peut citer notamment l'utilisation de pompes et turbines séparées reliées à la même machine électrique conçue pour fonctionner, soit comme moteur, soit comme générateur, et aussi l'emploi de turbines réversibles couplées à des pompes pour les barrages à faible ou moyenne hauteur de chute. Il sera peut-être nécessaire d'utiliser le pompage en deux phases pour les barrages à grande hauteur de chute.

Un autre moyen de donner une certaine souplesse aux centrales nucléaires est de combiner l'utilisation de la chaleur d'origine nucléaire et de la chaleur obtenue par combustion dans un même cycle thermique. Il serait possible d'appliquer ce principe avec le type de pile à eau bouillante. Dans ce projet, présenté sous forme de diagramme à la figure 3.

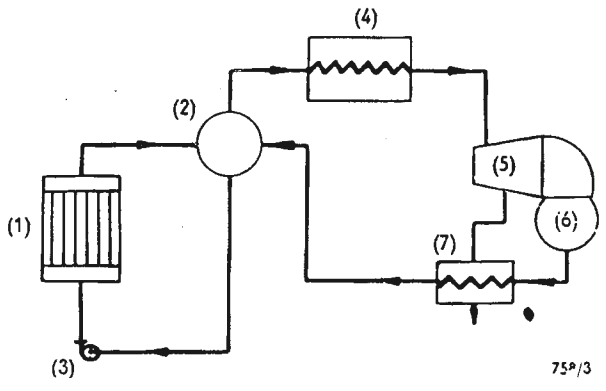


Figure 3. — Schéma d'un cycle de chaleur produite par la combinaison de l'énergie nucléaire et combustion.

1. Pile à eau bouillante; 2. Réservoir de vapeur; 3. Pompe pour la circulation de l'eau; 4. Surchauffeur mis à feu extérieurement; 5. Turbine; 6. Condensateur; 7. Réchauffeur d'eau d'alimentation.

la vapeur serait produite directement, à partir de la chaleur due à la fission, au cœur de la pile, et elle serait par la suite surchauffée au moyen d'un surchauffeur séparé, utilisant le charbon ou le pétrole. Cet arrangement entraînerait des complications dans la construction de la centrale, mais il offrirait l'avantage de combiner l'emploi modéré de la chaleur d'origine nucléaire à des températures relativement basses avec l'emploi efficace du point de vue thermodynamique de la chaleur produite par combustion à la fin du cycle de formation de vapeur et à des températures élevées. On pourrait encore accroître la souplesse de l'exploitation en insérant un second système de chauffage dans le cycle de production de vapeur.

PROBLÈMES DE TRANSPORT

Les piles avec ralentisseur en graphite et refroidissement au gaz sont considérées comme sans danger, et il devrait donc être possible de construire des centrales nucléaires équipées de cette façon en des points favorables du réseau de transport par rapport aux principaux centres de consommation. C'est surtout l'abondance de l'eau de refroidissement qui détermine le choix de l'emplacement d'une centrale nucléaire. Pendant quelque temps encore, on évitera probablement les régions à population dense, mais il ne devrait se poser aucun problème sérieux de transport à longue distance.

Par la suite, toutefois, il sera peut-être de plus en plus difficile de trouver des emplacements convenables où l'on dispose d'une quantité suffisante d'eau de refroidissement. Certains types de piles plus modernes pourront également poser des problèmes particuliers pour le choix de l'emplacement, par exemple en ce qui concerne l'élimination des matières sortant de certains modèles de piles homogènes. Il faudra peut-être construire les centrales utilisant des piles de ces types perfectionnés dans des lieux isolés. Le problème du transport à longue distance d'une importante quantité d'énergie se posera alors.

La situation sera analogue à celle que l'on rencontre fréquemment lorsqu'il s'agit d'énergie hydroélectrique. Il reste de très abondantes ressources en énergie hydroélectrique à mettre en valeur dans différentes parties du monde, mais ces ressources demeurent inexploitées parce qu'elles se trouvent dans des régions écartées et très éloignées des grands centres de consommation. Lorsqu'on étudie un projet particulier, il est nécessaire de comparer le coût de la construction et de l'exploitation, tant de la centrale hydraulique que de la ligne de transport, au coût correspondant d'une centrale thermique située à proximité du centre de consommation. Il faut décider pour chaque cas d'espèce, et il est difficile d'énoncer des principes d'application générale.

Les problèmes techniques du transport à longue distance ont continué à être étudiés ces dernières

années. Le principal progrès réalisé a été le transport de courant alternatif sous tension plus élevée et la mise au point simultanée d'appareils bien conçus pour la commutation et la protection. Il a fallu également concevoir diverses méthodes de compensation sur la ligne telles que l'emploi de condensateurs synchrones et de condensateurs en série. Une autre possibilité est le transport de courant continu sous tension élevée bien qu'il semble que pour l'instant cette méthode convienne mieux aux lignes sous-marines qu'aux lignes terrestres.

RÉSEAU D'INTERCONNEXION POUR LA PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

C'est au moyen d'une courbe de durée annuelle que l'on étudie le mieux quel usage il convient de réserver aux diverses ressources en énergie thermique, hydraulique ou nucléaire. Un exemple typique est donné à la figure 4. Si l'on part de l'hypothèse qu'il n'existe pas dans la région étudiée de grande centrale hydroélectrique, il sera normal d'employer des centrales nucléaires pour un taux d'utilisation très élevé, ainsi qu'il est indiqué par le rectangle le plus bas du diagramme. Pendant la première phase de mise en valeur, ces centrales utiliseront probablement des piles nucléaires du type à ralentisseur en graphite et à refroidissement au gaz. La production d'énergie pour la tranche moyenne de charge sera assurée surtout par les centrales thermiques de type classique chauffées au charbon ou au pétrole. La production pour la charge de pointe sera de préférence assurée par les centrales hydrauliques conçues expressément pour une exploitation

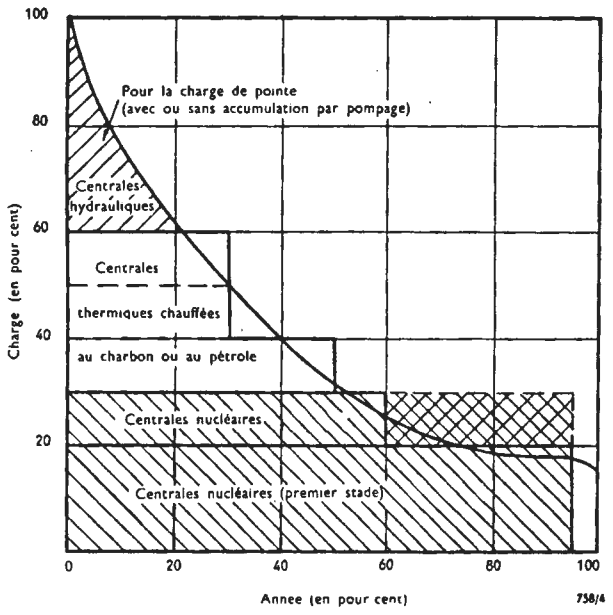


Figure 4. — Courbe montrant l'affectation des différents types de centrales.

à faible taux d'utilisation. Une autre solution sera d'utiliser les centrales hydrauliques à accumulation par pompage pour faire face à la charge de pointe, ce qui permettra d'exploiter une plus grande proportion de la puissance totale du système à un taux d'utilisation élevé; ce système justifierait la construction d'un nombre d'autant plus grand de centrales nucléaires. C'est ce que représente graphiquement le deuxième rectangle de la figure 4.

On peut espérer que les progrès techniques, dans la construction des centrales nucléaires, diminueront les frais d'installation et permettront dans l'avenir une exploitation satisfaisante à des taux d'utilisation relativement plus bas. Si ce progrès va de pair avec la construction de centrales hydrauliques et à accumulation par pompage destinées à faire face à la charge de pointe, il en résultera une tendance à limiter l'emploi des centrales thermiques de type classique à une tranche du taux d'utilisation située au milieu de la courbe de durée.

Il n'est pas sans intérêt d'imaginer ce que seront les événements dans peut-être vingt ans, époque à laquelle un certain nombre de centrales nucléaires approcheront de la fin de leur vie économique. Pour les centrales thermiques de type classique, il se produit normalement un abaissement régulier du taux d'utilisation et les centrales construites initialement pour faire face à des charges de base avec un rendement élevé peuvent terminer leur carrière comme centrales destinées à fournir la charge de pointe. Mais on ne voit guère comment il pourrait en être de même des centrales nucléaires et il est probable que l'on constatera dans l'avenir une tendance croissante à concevoir les centrales en fonction d'un taux d'utilisation précis et relativement rigide.

Les premières piles à neutrons thermiques fourniront de grandes quantités de matières fissiles concentrées sous forme soit du sous-produit, le plutonium, soit d'uranium-233; par la suite, il y aura de ce fait plus de liberté quant au nombre de types différents de piles dont la construction ou l'exploitation seront rentables. Il est possible que certains de ces modèles plus nouveaux, vraisemblablement de dimensions plus réduites, et d'un taux thermique spécifique plus élevé, conviennent à l'exploitation pour la charge de pointe du point de vue tant technique qu'économique. Toutefois, il ne faut pas sous-estimer la difficulté que présentent la transformation et la manutention des combustibles nucléaires concentrés, en particulier le plutonium.

CONCLUSIONS

Si l'on tente d'estimer à longue échéance les besoins du monde en énergie, on a l'impression que l'énergie nucléaire à commencé à être exploitée juste à temps. La demande d'électricité continue d'augmenter à un taux remarquablement régulier dans le monde entier. Faute d'une nouvelle source d'énergie, il faudrait faire face à cette augmentation surtout au moyen de centrales thermiques brûlant

du charbon ou du pétrole. Il existe déjà une grave pénurie de charbon, et le coût de l'extraction s'élève rapidement. Si le pétrole semble être abondant pour l'instant, c'est un combustible relativement cher pour les centrales; d'autre part, les combustibles liquides sont d'une telle importance pour les installations d'énergie mobiles et de petites dimensions, qu'il semble judicieux de réserver de plus en plus le pétrole pour les utilisations où l'on ne saurait se passer de combustible liquide.

De même, le charbon et le pétrole sont indispensables à deux des secteurs les plus importants de l'industrie chimique, et à l'avenir, il faudra plutôt considérer ces deux minéraux comme de précieuses substances chimiques que comme des combustibles à l'état brut. Citons ici Sir Harold Hartley, dans son cours de la fondation Graham Clark : « ...Heureusement, les possibilités qu'offre la centrale nucléaire se sont offertes au moment même où les perspectives d'augmenter substantiellement la production de charbon se font rares. Voici encore un exemple où les efforts conjugués de l'ingénieur-électricien, du chimiste, de l'ingénieur-mécanicien et de l'ingénieur du génie civil multiplieront les ressources du monde en énergie. Pour importante que soit l'électricité en tant que source de chaleur et d'énergie, notre économie est tributaire par bien des côtés du combustible liquide, et la naissance de l'énergie nucléaire permettra de réserver de plus en plus les ressources en charbon et en pétrole à la fabrication de produits chimiques et de ces combustibles liquides qui, pour de nombreuses utilisations, sont à la base de notre économie. »

Il faut également chercher à mettre en valeur l'énergie hydraulique, l'énergie marémotrice, l'énergie éolienne, la chaleur géothermique, et l'utilisation directe du rayonnement solaire. Ce n'est que par la mise en œuvre de ces diverses méthodes que le monde pourra faire face à ses besoins en énergie au moyen de ses richesses naturelles. Quant à l'énergie nucléaire, il faut faire appel aux ressources en capital du monde pour l'exploiter, car cette richesse nouvelle est très abondante et son utilisation permettra de conserver les quantités plus limitées de combustibles fossiles et d'en tirer le meilleur profit dans les années à venir.

Importance de l'énergie nucléaire pour l'économie du Brésil

par B. C. de Mattos * et J. C. Ribeiro **

INTRODUCTION

Le Brésil est un vaste pays dont les ressources et les richesses potentielles sont énormes mais dont le développement est entravé par deux obstacles importants : la difficulté des transports et la rareté des sources d'énergie.

Les principaux centres de population sont disséminés le long de la côte atlantique. La pénétration à l'intérieur du pays a toujours été très longue et difficile, à cause des hautes chaînes de montagne qui séparent le littoral de l'arrière-pays sur une grande partie de la côte, et faute de rivières navigables, qui dans d'autres régions du monde ont constitué un important réseau de communications et offert de faciles moyens de pénétration.

A l'exception des rivières du bassin de l'Amazone qui sont navigables mais aboutissent à la jungle de l'Amazone hyléenne, où les progrès de la civilisation se heurtent à de nombreux autres obstacles, et de la rivière San Francisco dont la partie navigable est interrompue par les chutes de Paulo Afonso, il n'existe pour ainsi dire pas de rivières importantes que l'on puisse considérer comme des voies de pénétration.

La rareté des gisements de charbon et de pétrole est également un élément important dont il faut tenir compte. Les mines de charbon des États de Santa Catarina et de Rio Grande do Sul donnent un combustible de médiocre qualité; elles ne sont pas très étendues, et leur production ne peut servir qu'aux industries locales et aux réseaux ferroviaires de la partie méridionale du pays, sans qu'il soit possible de les transporter ailleurs dans des conditions rentables.

Les gisements pétrolifères reconnus de Bahia ne sont point importants; s'ils étaient pleinement exploités, ils fourniraient environ un dixième de la consommation actuelle de pétrole du pays.

La découverte récente de nouveaux champs pétrolifères dans le bassin de l'Amazone est l'une des raisons les plus sûres d'espérer la mise en valeur rapide des sources brésiliennes d'énergie convenant particulièrement aux transports, mais l'on ne peut encore estimer leur véritable importance, car on ne dispose jusqu'à présent d'aucun chiffre sur leur capacité.

Le Brésil dispose d'abondantes ressources en énergie hydraulique, mais elles se trouvent généralement à de trop grandes distances des régions développées et industrialisées du pays.

Le principal système de production hydroélectrique du Brésil, qui dessert les régions industrielles de Rio et de Sao Paulo, a récemment augmenté sa puissance grâce à la construction d'une centrale thermique à Piratininga (État de Sao Paulo) (fig. 1) qui consomme du pétrole importé. Ce fait seul démontre à l'évidence la gravité des problèmes énergétiques et les difficultés qu'ils soulèvent au Brésil.

Étant donné ce qui précède, on saisira facilement l'intérêt particulier que l'énergie atomique revêt pour un pays comme le Brésil, qui passe rapidement d'une économie agricole à une économie industrialisée.

C'est surtout au début de cette période de transition que les besoins en énergie augmentent très rapidement. Au cours des 12 années qui se sont écoulées de 1940 à 1952, la consommation totale d'énergie au Brésil a plus que doublé.

Les économistes brésiliens et le Gouvernement brésilien se préoccupent du fait qu'une partie importante de la consommation d'énergie est fournie par des combustibles importés, principalement du charbon et du pétrole; ces importations pèsent lourdement sur la balance commerciale du Brésil.

Dans ces circonstances le Brésil se trouve, en ce qui concerne le problème de l'énergie atomique, dans une situation très particulière par rapport à d'autres pays dotés de réserves d'énergie de sources classiques; on comprendra donc le vif intérêt que les autorités brésiliennes portent à ce problème par l'intermédiaire du Conseil national de la recherche et de la Commission de l'énergie atomique du Brésil.

L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE AU BRÉSIL

Pour décrire clairement, ne serait-ce que d'une façon sommaire, la situation actuelle de l'électricité au Brésil, nous devons étudier séparément chacune

---

Original : anglais.

* Commission de l'énergie atomique du Conseil national de la recherche du Brésil, Rio de Janeiro, D. F., Brésil.

** Département de physique, Faculté nationale de philosophie, Université du Brésil, Rio de Janeiro, D. F., Brésil.

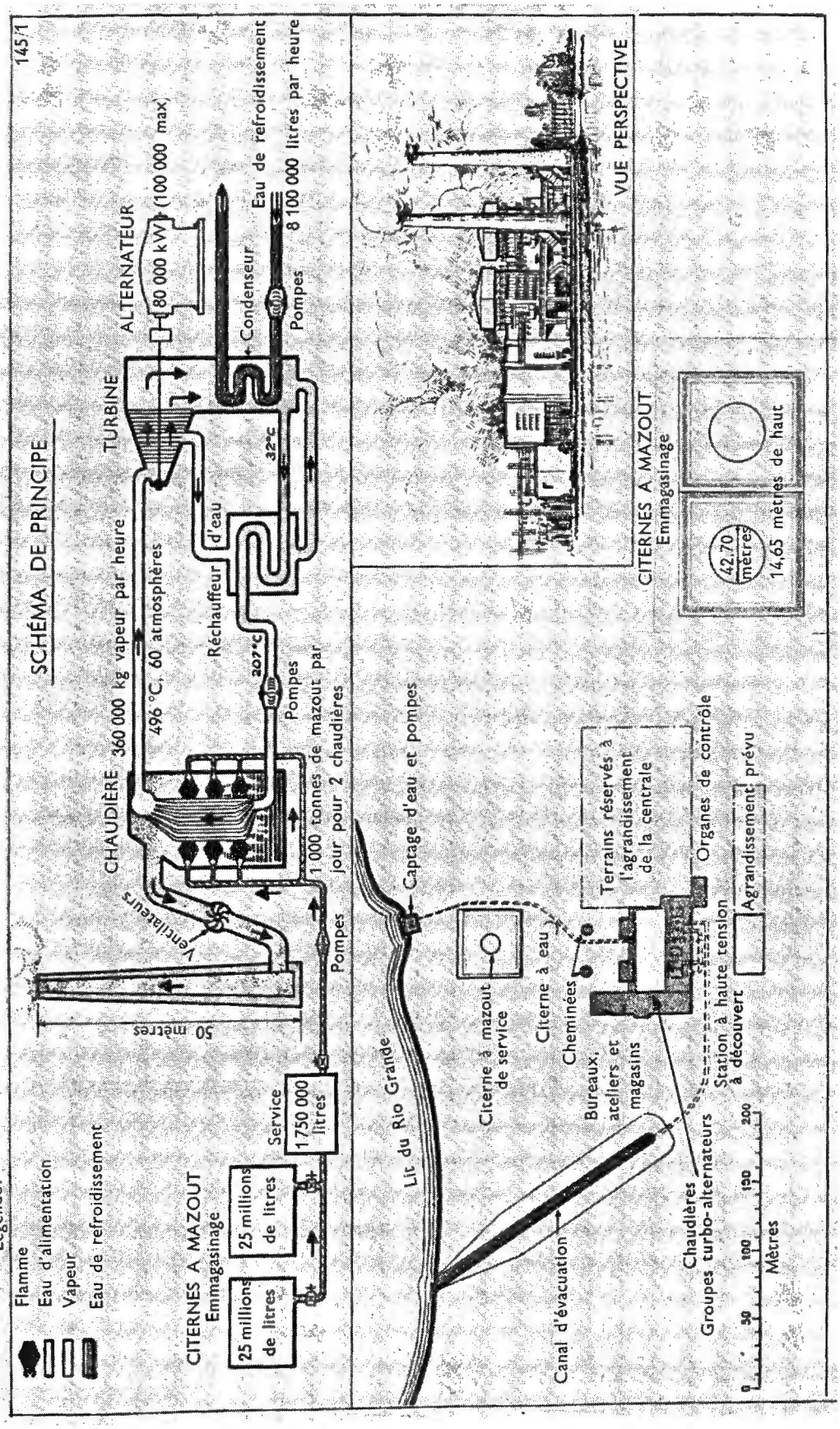


Figure 1. — Centrale thermique de Piratininga, Brésil.

Tableau 1

Distribution géographique du potentiel hydraulique du Brésil

N°	Régions	Potentiel en kW	Pourcentage du total
1	Nord	3 601 800	21,9
2	Nord-est . . .	727 170	4,4
3	Est.	5 295 150	32,1
4	Sud	4 419 650	26,9
5	Centre-ouest. .	2 413 100	14,7
	Total pour le Brésil. . . .	16 456 870	100,0

des diverses régions du pays dont la superficie s'élève à 8 416 037 km² ce qui le classe troisième parmi les plus grands pays du monde.

D'après les données dont on dispose sur ces régions, l'énergie hydraulique au Brésil se répartit selon les indications données au tableau 1.

Bien que le pays soit le quatrième pays du monde pour ce qui est des ressources en énergie hydraulique, il commence à peine à mettre en valeur ses immenses réserves, qu'il n'a utilisées jusqu'à présent que pour produire 2 805 527 kW, comme il ressort du tableau 2.

Sur les 2 284 centrales en exploitation, on compte 1 050 centrales thermiques et 1 234 centrales hydrauliques.

Nous étudierons en premier lieu les réseaux les plus importants et nous mentionnerons ceux dont la puissance est inférieure selon que l'occasion s'en présentera.

A. Réseau de Serra do Mar

Le 7 avril 1889 a été créé à Sao Paulo la première société constituée à l'aide de capitaux privés en vue d'exploiter l'industrie de l'énergie électrique au Brésil.

Elle prit pour raison sociale « Compagnie des tramways, d'éclairage et d'énergie de Sao Paulo », et, en 1901, elle commença à faire fonctionner une centrale hydraulique dont la puissance initiale atteignait 2 000 kW. En 1900, elle exploitait une petite centrale thermique équipée de deux génératrices de 500 kW, qui lui permettait d'alimenter les lignes de tramways de la ville de Sao Paulo, dont la population s'élevait à environ 240 000 habitants.

Depuis lors, la population a augmenté dans une telle mesure que cette ville est considérée à l'heure actuelle comme la ville du monde qui augmente le plus rapidement. Pendant la même période, la capacité des centrales hydrauliques appartenant à la Compagnie des tramways et desservant la ville de Sao Paulo s'est multipliée par 600. A la fin de 1952, la puissance installée s'élevait à 600 000 kW.

En 1948, la ville de Sao Paulo comptait environ deux millions d'habitants et consommait 6 789 kWh par habitant; ainsi, l'indice de la consommation est passée de 100 en 1901 à 264 en 1948.

Sao Paulo est un centre hautement industrialisé qui produit 43,5 pour cent des produits manufacturés de l'ensemble du pays.

Actuellement, la Compagnie des tramways construit aussi rapidement que possible trois nouvelles centrales électriques dans la région qu'elle dessert. La puissance installée de cette région se trouvera alors portée à 790 000 kW.

On constate donc que le programme de construction de ce seul État prévoit une production plus importante que le total de l'énergie électrique distribuée dans le pays tout entier.

Toutefois, en dépit de cette réalisation des plus remarquables, l'essor extraordinaire et continu de Sao Paulo a provoqué une pénurie; les pouvoirs publics ont donc dû imposer un sévère régime de

Tableau 2

Puissance installée au 31 décembre 1954

N°	Régions	Nombre de centrales	Puissance installée (en kW)			Superficie (en km²)	Population	Puissance installée	
			Hydraulique	Thermique	Totale			W par km²	W par habitant
1	Nord	110	16	17 798	17 814	3 571 612	1 844 655	3 553	6 879
2	Nord-est	480	12 832	94 765	107 597	972 275	12 494 477	119 917	2 331
3	Est	845	1 167 766	134 751	1 302 517	1 261 757	18 893 007	617 282	41 224
4	Sud	772	984 354	380 673	1 365 027	825 358	16 975 293	1 285 670	62 511
5	Centre-ouest . .	77	3 050	4 030	12 080	855 035	1 736 965	8 230	8 932
	Total pour le Brésil	2 284	2 173 226	632 301	2 805 527	8 516 037	51 944 397	233 066	38 210

Source : « Aguas e Energia » n° 19, Département de l'énergie et des eaux, Brésil.

N. B. — Le total de 2 284 centrales se répartit en 1 050 centrales thermiques et 1 234 centrales hydrauliques.

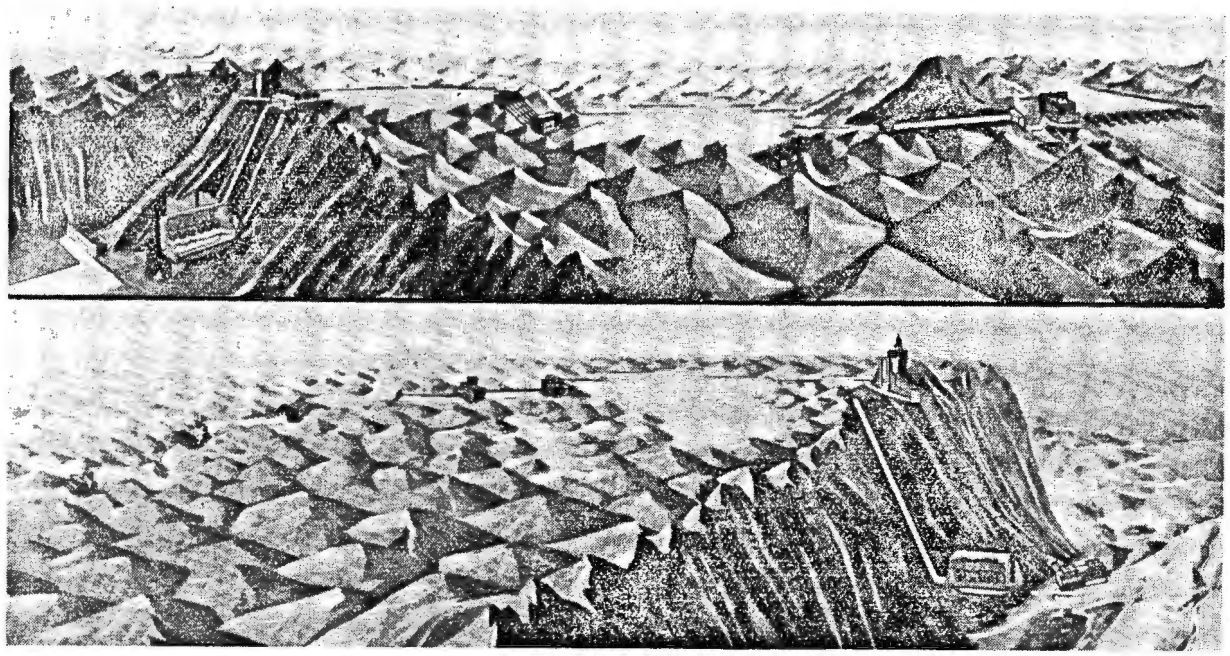


Figure 2.

En haut : Vue panoramique de l'ensemble hydroélectrique qui dessert Rio de Janeiro, montrant le projet de dérivation de la Paraiba-Pirai. Le barrage de Santa Cecilio, sur la Paraiba, régularise le débit du fleuve; des pompes extrêmement puissantes élèvent d'une dizaine de mètres le niveau de l'eau et l'amènent, par un tunnel et un canal, dans le bassin d'accumulation de Santana. La station de pompage de Vigario élève encore d'environ 35 m le niveau de l'eau dans un second bassin d'accumulation; un canal l'amène ensuite à une conduite forcée qui l'amène à son tour à l'usine souterraine de Nilo Peçanha. Cette usine, dont deux alternatrices fonctionnent déjà, doit porter la puissance du groupe de Fontes aux environs de 330 000 kW.

En bas : Vue panoramique de l'ensemble hydroélectrique de la Compagnie des tramways de Sao Paulo, constitué par des barrages, des stations de pompage et des bassins d'accumulation; l'ensemble de Serra do Mar est le principal producteur d'électricité de Sao Paulo et de la région environnante. De Serra do Mar à l'usine de Cubatao, la hauteur de chute est de 760 m, et l'usine actuelle a une puissance installée de 484 000 kW; cette puissance sera augmentée de 390 000 kW par l'achèvement de la future centrale souterraine de Cubatao.

rationnement qui a, naturellement, fortement gêné le développement de la production locale. Des mesures urgentes, notamment le montage temporaire de quelques milliers de génératrices à moteur diesel, ont été prises pour parer à cette situation regrettable.

Néanmoins, en dépit de ces circonstances critiques, la Compagnie des tramways a essayé d'agrandir ses installations; elle a construit la centrale thermique de Piratininga, dont la puissance est de 200 000 kW, et a également augmenté la puissance de Serra do Mar (fig. 2), immense ensemble hydroélectrique comprenant de vastes bassins d'accumulation de centaines de kilomètres carrés, ce qui a entraîné la construction de nombreux barrages dans les régions plus basses de la périphérie, au confluent de plusieurs fleuves et rivières.

On a installé de puissantes pompes électriques dans les lieux où l'inégalité du terrain ne permettait pas de faire communiquer directement les eaux au moyen de canaux ou de galeries.

Pour donner une idée assez juste de la conception intelligente de ce projet, il suffit de dire que l'on a pompé l'eau, à l'aide de pompes électriques, à une hauteur de quelques mètres seulement, pour lui permettre de se jeter dans les turbines d'une hauteur de plus de 700 m.

La centrale de Cubatao, qui se trouve à quelques kilomètres du port de Santos, est la plus remarquable des centrales électriques qui sont reliées à Serra do Mar. Avec ses 8 groupes générateurs, elle est l'une des premières centrales électriques du monde.

La centrale de Cubatao a été aménagée en sous-sol (fig. 3), et elle aura une puissance initiale de 260 000 kW dès que le premier groupe de générateurs sera mis en service, à la fin de 1955. Les trois autres groupes générateurs, de 65 000 kW de puissance chacun, entreront en service au début de 1956. Cette centrale a été construite pour augmenter la production d'électricité destinée à la ville de Sao Paulo. Lorsqu'elle sera complètement installée, elle aura une puissance totale de 2 000 000 HP.

Au cours de ces 40 années d'exploitation, les ventes de courant de la Compagnie des tramways de Sao Paulo se sont trouvées multipliées par mille.

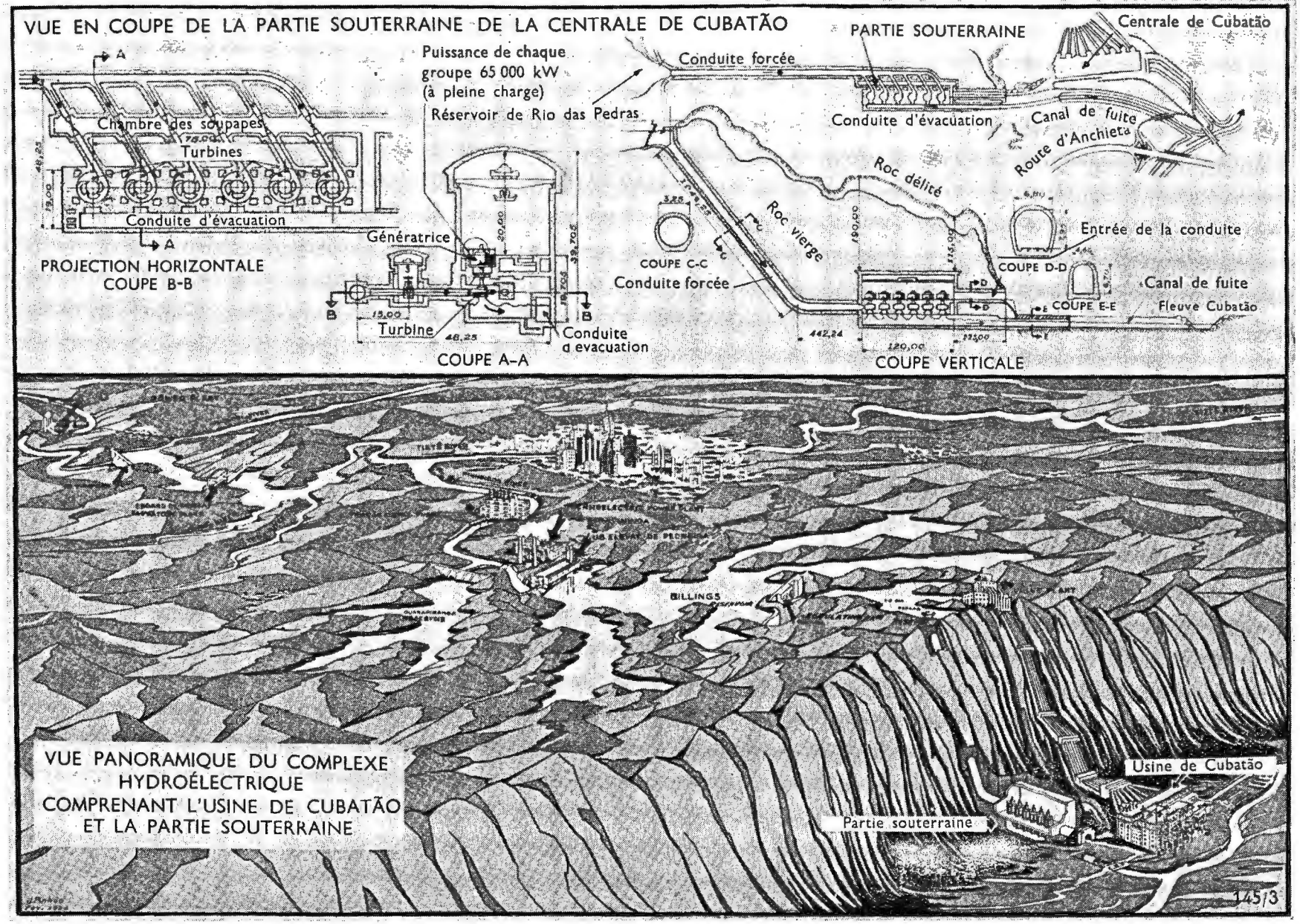

VUE EN COUPE DE LA PARTIE SOUTERRAINE DE LA CENTRALE DE CUBATÃO
Puissance de chaque groupe 65 000 kW (à pleine charge)
Réservoir de Rio das Pedras
Conduite forcée
PARTIE SOUTERRAINE
Centrale de Cubatão
Conduite d'évacuation
Canal de fuite
Route d'Anchieta
Roc délité
Roc vierge
Chambre des soupapes
Turbines
Conduite d'évacuation
PROJECTION HORIZONTALE
COUPE B-B
Génératrice
Turbine
Conduite d evacuation
COUPE A-A
COUPE C-C
Conduite forcée
COUPE D-D
Entrée de la conduite
COUPE E-E
Canal de fuite
Fleuve Cubatão
COUPE VERTICALE
VUE PANORAMIQUE DU COMPLEXE HYDROÉLECTRIQUE COMPRENANT L'USINE DE CUBATÃO ET LA PARTIE SOUTERRAINE
BILLINGS
Usine de Cubatão
Partie souterraine
145/3

Figure 3.

Avec ses 15 centrales hydrauliques, ses 43 génératrices et son système complexe de transmissions interconnectées, la compagnie a enregistré une consommation journalière de 10 millions de kWh en 1950.

B. Centrale électrique de Lages

La centrale électrique de Lages (fig. 4) appartient à la Compagnie d'éclairage et d'énergie de Rio de Janeiro, dont le siège se trouve dans la capitale du Brésil, et à laquelle on doit également des réalisations remarquables du « Réseau de Rio de Janeiro ».

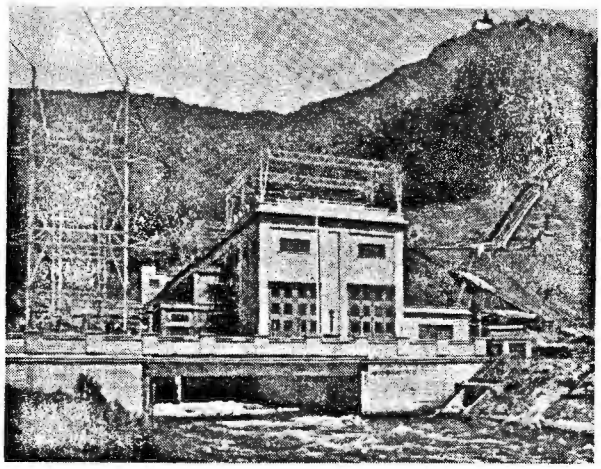


Figure 4. — Centrale hydraulique de Lages.

Elle a débuté en 1908 avec deux centrales; la centrale de Ribeirao das Lages et la centrale de Fontes, dont la puissance atteignait au total 24 000 kW. Toutefois, l'essor rapide de Rio de Janeiro et le développement de ses industries ont obligé cette compagnie à agrandir ses installations et à porter la production de la centrale de Lages à 64 000 kW. La Compagnie croyait que cette augmentation de puissance suffirait à approvisionner en électricité non seulement le District fédéral, mais encore une partie de l'État voisin de Rio de Janeiro pendant une dizaine d'années au moins. Mais les prévisions de la compagnie ont été dépassées par l'expansion extraordinaire de la ville et de ses usines, de sorte que la Compagnie d'éclairage et d'énergie de Rio de Janeiro dut, entre 1920 et 1923, augmenter la puissance de ses installations électriques en construisant sur la rivière Parahiba, à Ilha dos Pombos, une nouvelle centrale du type « au fil de l'eau et à faible hauteur de chute », dont la puissance totale s'élève à 162 000 kW. L'exploitation de cette centrale est combinée à celle de la centrale de Fontes. Pendant la saison des pluies, la centrale d'Ilha dos Pombos utilise les eaux de crue de la rivière Parahiba, et doit produire à elle seule la majeure partie de l'électricité nécessaire à la région consommatrice.

La puissance de cette centrale (162 000 kW), à laquelle s'ajoutait celle de la centrale de Fontes (64 000 kW), suffit aux besoins de la région jusqu'au début de la seconde guerre mondiale; la nécessité apparut alors clairement d'agrandir encore la centrale de Fontes.

L'accroissement possible du volume des eaux emmagasinées dans le bassin d'accumulation de Lages a permis d'installer trois génératrices de plus dans la centrale électrique de Fontes.

Chacune de ces génératrices ayant une puissance de 42 000 kW, la puissance totale de la centrale a été portée à 190 000 kW.

Pourtant, même cette augmentation ne suffit pas à faire face aux besoins toujours plus grands de la région que desservait la compagnie, aussi celle-ci décida-t-elle d'entreprendre la mise en œuvre d'un nouveau projet, la dérivation de la Parahiba-Pirai (fig. 2). Ce projet, semblable dans ses grandes lignes au fameux projet de Serra mis en œuvre dans l'État de Sao Paulo (d'après lequel les cours d'eau coulant vers l'ouest sont détournés au-dessus de la Serra do Mar pour alimenter la centrale de Cubatao), a pour objet d'amener l'eau de la Parahiba à travers le bassin de la Pirai jusqu'à la centrale électrique de Fontes (fig. 5). Il utilise également les eaux moins abondantes du ruisseau de Vigario et emprunte sa vallée pour amener les eaux jusqu'à la centrale de Fontes.

Ce projet est l'un des plus importants et des plus hardis de l'Amérique latine; il produit au total 668 000 kW, dont 330 000 kW sont fournis par la centrale souterraine de Nilo Peçanha.

C. Réseau de la Compagnie des entreprises électriques brésiliennes

Outre le groupe d' « éclairage et énergie », le groupe des entreprises électriques brésiliennes (EEB) est l'un des plus importants producteurs d'électricité du pays. L'EEB fournit depuis longtemps de l'électricité à plusieurs États du Brésil. L'ampleur et le développement des services fournis par ce groupe peuvent être évalués grâce aux données statistiques figurant au tableau 3, qui illustre le développement du réseau pendant les vingt dernières années.

En 1953, les lignes de transmission et de distribution des douze compagnies associées constituant ce groupe atteignaient au total 15 360 km, et employaient 11 508 personnes. Ce réseau couvre une superficie étendue qui va des frontières septentrionales aux frontières méridionales du pays; mais la majeure partie se trouve en bordure de la mer. La compagnie est également concessionnaire d'une vaste zone industrielle dans l'État de Sao Paulo. L'EEB est une filiale de l'American and Foreign Power Company, entreprise qui travaille en collaboration avec l'Ebasco International Corporation, bien connue aux États-Unis pour ses moyens

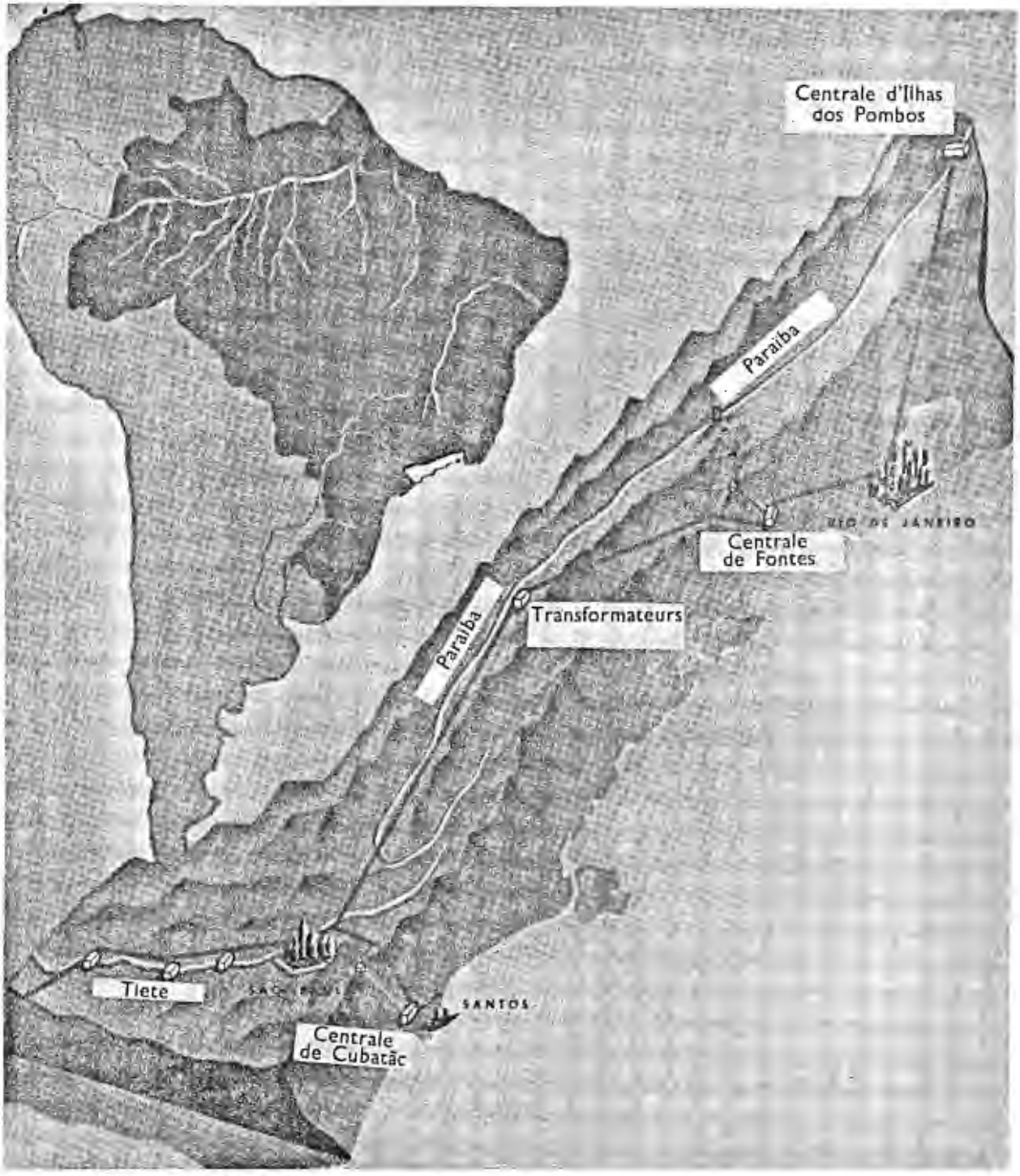


Figure 5.

Note. — Bien que la superficie desservie représente moins de 1 pour cent du territoire brésilien, le groupe « Éclairage et énergie » y a construit des centrales qui produisent plus de 50 pour cent de toute l'électricité produite au Brésil.

techniques et les travaux qu'elle a exécutés dans de nombreux pays étrangers.

Au cours des dernières années, la demande d'électricité n'a cessé d'augmenter dans toutes les régions desservies par l'EEB, en raison de l'élévation du niveau de vie brésilien, de l'utilisation des richesses naturelles et de l'industrialisation croissante du pays. Un autre facteur de cet essor extraordinaire est le fait que la population augmente chaque année d'au moins un million d'habitants.

Pour faire face à cet accroissement constant de la demande d'électricité, l'EEB a progressivement

Tableau 3

Production d'énergie électrique en 1952

	Production thermique				Production hydraulique			Total de l'énergie électrique (en milliers de kWh)
	Puissance maximum (en kW)	Combustible solide (en milliers de kW)	Combustible liquide ou gaz (en milliers de kW)	Total (en milliers de kW)	Puissance maximum disponible (en milliers de kWh)	Énergie emmagasinée (en milliers de kWh)	Énergie produite (en milliers de kWh)	
Compagnie d'éclairage et d'énergie de Rio de Janeiro	37 000	—	23 000	23 000	317 000	178 000	2 001,690	2 024,690
Compagnie d'éclairage et d'énergie de Sao Paulo . .	8 220	—	10 920	10 920	578 110	2 361 377	3 512,690	3 523,610
Entreprises électriques brésiliennes .	83 805	141 723	236 782	378 505	182 839	43 320	1 002,860	1 381,365

agrandi ses installations de production, de transport, de transformation et de distribution. En 1952, la Compagnie d'éclairage et d'énergie et les Entreprises électriques brésiliennes ont contribué pour une part importante à la production d'électricité en construisant de nouvelles centrales, comme le montre le tableau 3.

Actuellement l'EEB construit deux nouvelles centrales hydrauliques, l'une à Peixoto, dans l'État de Sao Paulo, dont la puissance totale s'élèvera à 1 100 000 kW, et l'autre à Guaricana, dans l'État de Paraná, dont la puissance totale s'élèvera à 15 000 kW. Ces deux centrales entreront en service en 1956.

D. Centrale de Paulo Afonso, Compagnie hydroélectrique de Sao Francisco

La compagnie hydroélectrique de Sao Francisco tire son énergie des chutes de Paulo Afonso, sur la rivière Sao Francisco, qui coule parallèlement à la mer vers le nord, puis fait un coude vers l'est et se jette dans l'océan Atlantique. Le bassin de Paulo Afonso est une longue dépression relativement étroite, entourée d'une ceinture de montagnes élevées, s'élevant de 1 000 à 1 500 mètres au-dessus du niveau de la mer et de 600 à 1 000 m au-dessus du niveau de la rivière Sao Francisco, sur laquelle se trouvent les chutes de Paulo Afonso. Il s'agit d'un bassin relativement large, de 609 917 km² de superficie.

On estime au Brésil que la rivière Sao Francisco offre de grandes possibilités, que l'on peut répartir en trois groupes principaux : 1) irrigation, 2) navigation et 3) production d'électricité.

Bien que ces trois objectifs revêtent exactement la même importance, c'est l'étude du potentiel hydroélectrique de la rivière Sao Francisco qui présente le plus d'intérêt, étant donné qu'elle ajoute à son potentiel extraordinaire une situation idéale, et permet de produire une énergie abondante à un prix très raisonnable.

Telles sont les raisons pour lesquelles le Gouvernement brésilien a fondé la compagnie hydroélectrique de Sao Francisco, à l'aide de capitaux privés et de fonds publics, en tenant compte des avantages considérables que la mise en valeur de cette rivière présenterait pour l'essor économique de la vaste région du nord-est du pays.

Les chutes de Paulo Afonso, hautes de 81 m, permettent la construction d'une centrale de 900 000 kW. Les plans de construction de la centrale s'écartent complètement des anciennes méthodes classiques suivies pour les constructions de ce genre, et innovent en raison de la situation de la centrale. L'originalité de la construction fait honneur à la compétence des ingénieurs brésiliens.

La centrale est le point de départ de deux lignes principales de transport à 220 kV, dont la première, qui a 405 km de long, se dirige vers le nord et la seconde, de 457 km, se dirige vers le sud.

Cette importante centrale a déjà été inaugurée et approvisionne actuellement en électricité les vastes territoires du nord-est du Brésil (voir fig. 6).

E. Le réseau électrique de Minas Gerais (CEMIG)

Depuis de nombreuses années, les autorités de l'État de Minas Gerais consacrent beaucoup de temps et de soins à assurer un approvisionnement suffisant en énergie électrique aux régions les plus riches de promesses de cet État, encourageant et soutenant à cet effet l'initiative privée qui s'efforce

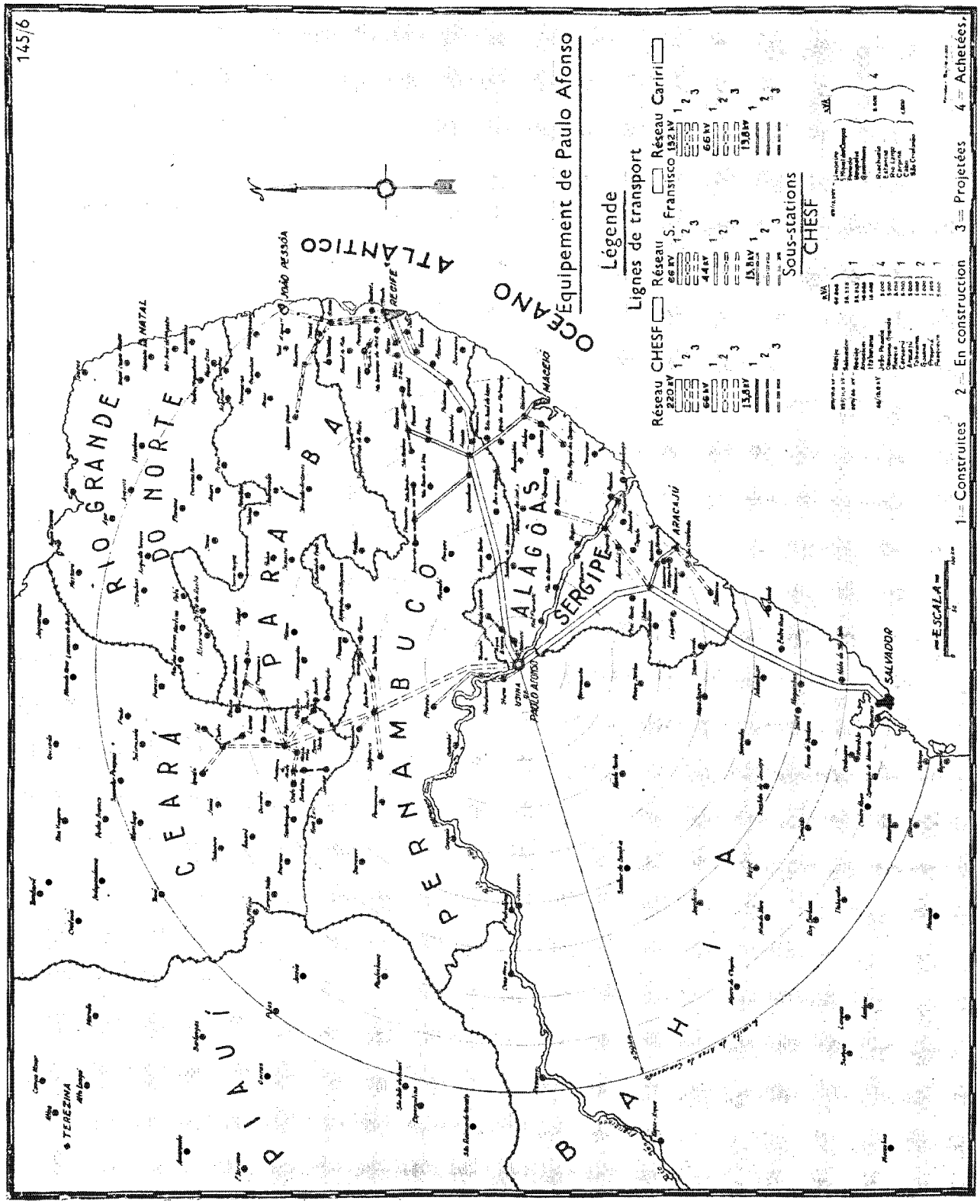


Figure 6. — Aménagements de Paulo Afonso.

d'aménager de nouveaux réseaux électriques qui permettront de mieux développer les activités économiques.

Nous devons mentionner le fait important que c'est dans l'État de Minas Gerais que se trouvent les plus riches gisements de minéraux du Brésil. Plus de la moitié de la superficie de cet État se trouve à 600 m d'altitude et représente 16 pour cent de l'ensemble du territoire brésilien. Ses réserves de minerai de fer à haute teneur sont évaluées à 15 milliards de tonnes, dont la moitié a une teneur en métal supérieure à 60 pour cent. L'État de Minas Gerais pourvoit à 85 pour cent de la consommation intérieure totale de minéraux.

Les plus grands gisements d'uranium du Brésil se trouvent dans l'État de Minas Gerais, ainsi que ses réserves souterraines d'or et de platine les plus abondantes, sans mentionner d'énormes quantités de manganèse et de cristal de quartz.

Outre cette somme de richesse minérale, le sol de cet État se prête également à l'agriculture.

La nécessité absolue où se trouvait le gouvernement d'encourager et de coordonner la production d'énergie électrique l'a amené à mettre en œuvre un plan d'électrification important, prévoyant que les approvisionnements en énergie électrique doublent tous les 5 ans. En raison du rythme rapide auquel la demande s'accroît, cet État produit actuellement 200 000 kW de plus et compte produire 400 000 kW en 1956. Lorsque sera terminé le programme dont s'est chargé la CEMIG, le Gouvernement de l'État de Minas Gerais et d'autres compagnies privées posséderont 2 128 400 HP installés sur l'ensemble de son territoire.

F. Commission de l'énergie électrique du réseau de l'État de Rio Grande do Sul

Ce réseau est constitué par une série d'ouvrages construits par les compagnies de l'État. En 1949, les centrales électriques appartenant à l'entreprise privée fournissaient environ 130 000 kW, alors que les services publics fournissaient un peu plus de 60 000 kW, de sorte que la consommation moyenne par habitant s'est élevée à 19 watts dans l'État de Rio Grande do Sul.

Le programme de mise en valeur que le gouvernement réalise actuellement porte sur la construction de six grandes centrales hydrauliques et deux centrales thermiques. La production de ces centrales, et d'autres centrales de moindre importance également en cours de construction, augmentera de 175 444 kW la puissance installée de cette région.

G. Groupe de compagnies d'électricité privées et indépendantes

Ce groupe comprend environ une centaine de petites compagnies, disséminées dans tous les États du Brésil, qui exploitent des centrales hydrauliques et thermiques dont la puissance varie de 200 à 14 000 kW et atteint au total 240 703 kW.

Pour terminer cet examen sommaire de la question de l'énergie électrique au Brésil, nous devons souligner le fait que notre pays souffre d'un « déficit » d'environ 1 million de kW. Ce déficit s'explique par deux raisons : tout d'abord, le pays n'a pas pu, au cours de la dernière guerre, acheter de nouveaux biens d'équipement pour son industrie électrique, et deuxièmement, sa législation intérieure impose des restrictions de change.

Cette insuffisance de la production d'énergie électrique est l'un des principaux obstacles à l'essor total et normal de l'économie brésilienne.

L'industrialisation du pays et, avant tout, le rythme rapide auquel se développent les grands centres urbains au cours de cette industrialisation, ont énormément accru la consommation d'électricité, mais les entreprises de vente d'énergie n'ont pu s'adapter à la cadence extraordinairement rapide de ce développement.

En 1950, la production d'électricité avait augmenté de 150 pour cent par rapport à 1939, alors que la production industrielle et agricole avaient augmenté de 118 pour cent par rapport aux années d'avant-guerre. Cet accroissement de la production d'électricité, dont le taux dépasse très largement celui de l'expansion des industries manufacturières et extractives, et de l'agriculture, peut sembler paradoxal à considérer que le problème de l'électricité se pose avec la même acuité dans tout le Brésil.

Il semble que quatre facteurs principaux soient à l'origine de la progression géométrique de la demande d'énergie électrique : le rythme accéléré auquel se développent les grandes agglomérations urbaines, dont l'accroissement spectaculaire de Sao Paulo fournit un exemple pertinent, puisque la population de cette ville est passée de 1,3 million d'habitants en 1940, à plus de 2,6 millions en 1953, chiffre qui en fait la ville la plus peuplée du Brésil.

De 1940 à 1950, la population est passée de 1,6 à 2,4 millions d'habitants dans le District fédéral, et de 12,9 à 19,2 millions dans l'ensemble du pays, compte tenu uniquement des localités d'au moins 5 000 habitants.

On se fera une idée de la demande d'électricité qui a accompagné cet essor remarquable des villes, en examinant l'accroissement non moins remarquable de la consommation d'électricité pour usages ménagers dans la ville de Sao Paulo et le District fédéral. Ces deux centres ont augmenté leur consommation de 80 pour cent entre 1946 et 1952, soit de 10 pour cent chaque année.

Les approvisionnements en électricité nécessaires au développement de l'industrie ne sont pas toujours exactement proportionnels à la demande, et il arrive fréquemment qu'ils lui soient supérieurs. En même temps, l'installation d'usines de traitement de matières premières à l'intérieur du pays a marqué

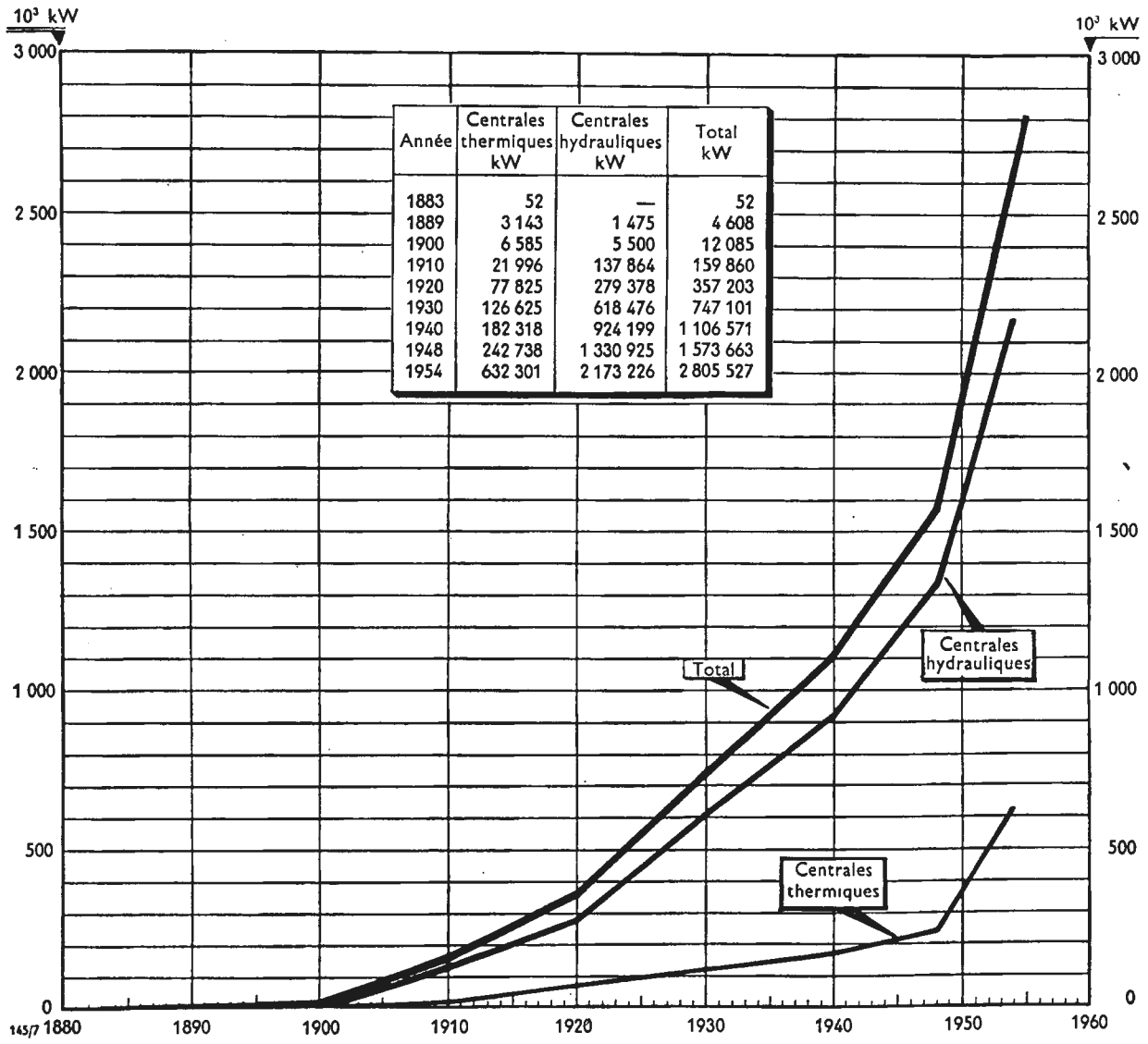
une progression sensible, particulièrement dans les régions nouvellement défrichées. Ainsi, la demande d'électricité destinée aux consommateurs industriels de ces régions a-t-elle le pas sur la demande des ménages, étant donné que ces trois modes de services sont exploités conjointement dans l'aménagement de toute collectivité nouvelle. En outre, la demande initiale de services d'électrification rurale qui s'est manifestée dans certains districts de l'État de Sao Paulo et de l'État de Rio Grande do Sul a nettement fait ressortir l'importance toujours plus grande de la consommation d'électricité dans les campagnes.

Toutes ces considérations démontrent la vitalité d'un pays qui se trouve gêné uniquement par le rythme rapide et démesuré de son développement.

Si le taux actuel de l'accroissement de la population et de la production se maintient (fig. 8), notre pays aura besoin dans dix ans de nouvelles installations de production d'énergie d'une puissance de 5 900 000 kW. Le Brésil pourra installer environ 30 millions de kW en construisant des centrales hydrauliques, ce qui modifiera considérablement sa position par rapport à la production mondiale d'énergie. Il produira alors environ 8 pour cent de l'énergie hydraulique du monde, au lieu de 3,9 pour cent, chiffre de sa production actuelle.

Conclusions

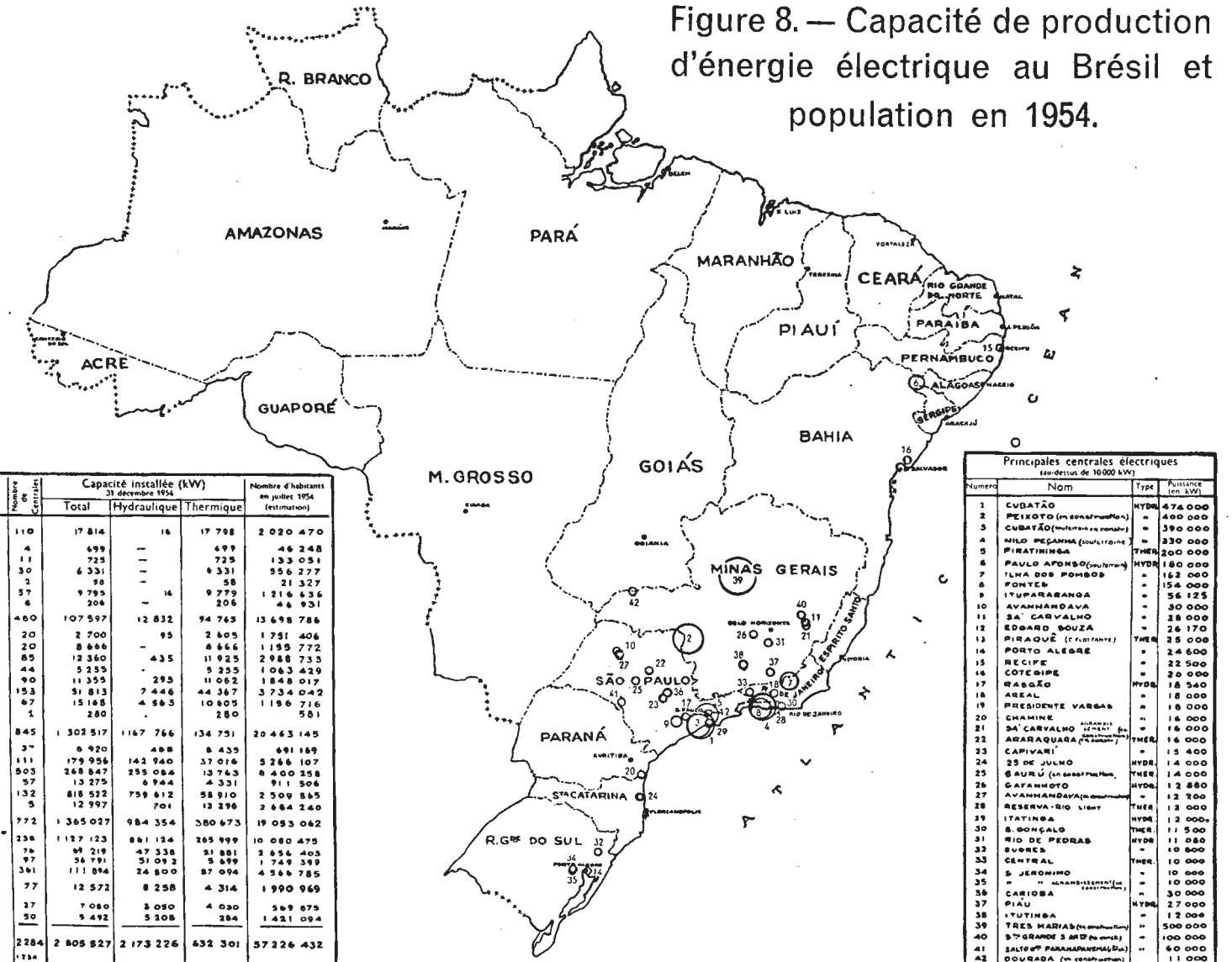
L'exposé qui précède montre que le Brésil, bien qu'il soit le quatrième pays du monde pour ce qui est du potentiel hydraulique, n'a pu, jusqu'à présent, tirer parti que de 2 173 326 kW (fig. 7) d'un potentiel évalué à 16 456 850 kW pendant la saison sèche. Cette situation s'explique en partie par le fait que les



Année	Centrales thermiques kW	Centrales hydrauliques kW	Total kW
1883	52	—	52
1889	3 143	1 475	4 608
1900	6 585	5 500	12 085
1910	21 996	137 864	159 860
1920	77 825	279 378	357 203
1930	126 625	618 476	747 101
1940	182 318	924 199	1 106 571
1948	242 738	1 330 925	1 573 663
1954	632 301	2 173 226	2 805 527

Figure 7. — Total de la puissance installée au Brésil.

Figure 8. — Capacité de production d'énergie électrique au Brésil et population en 1954.



Régions physiographiques et États de la Fédération	Nombre de Centrales	Capacité installée (kW) 31 décembre 1954 — Total	Hydraulique	Thermique	Nombre d'habitants en juillet 1954 (estimation)
Nord	110	17 814	16	17 798	2 020 470
GUAPORÉ	4	699	—	699	46 248
ACRE	11	725	—	725	133 051
AMAZONAS	30	6 331	—	6 331	556 277
RIO BRANCO	2	58	—	58	21 327
PARÁ	57	9 795	16	9 779	1 216 636
AMAPÁ	6	206	—	206	46 931
Nord-est	460	107 597	12 832	94 765	13 698 786
MARANHÃO	20	2 700	95	2 605	1 751 406
PIAUÍ	20	8 666	—	8 666	1 195 772
CEARÁ	85	12 360	435	11 925	2 988 733
RIO GRANDE DO NORTE	44	5 255	-	5 255	1 063 429
PARAÍBA	90	11 355	293	11 062	1 848 017
PERNAMBUCO	153	51 813	7 446	44 367	3 734 042
ALAGÔAS	67	15 168	4 563	10 605	1 196 716
FERNANDO DE NORONHA	1	280	-	280	581
Est	845	1 302 517	1167 766	134 751	20 463 145
SERGIPE	37	8 920	485	8 435	691 189
BAHIA	111	179 956	142 940	37 016	5 266 107
MINAS GERAIS	503	268 847	255 084	13 763	8 400 258
ESPIRITO SANTO	57	13 275	8 944	4 331	911 506
RIO DE JANEIRO	132	818 522	759 812	58 910	2 509 865
DISTRITO FEDERAL	5	12 997	701	12 296	2 684 240
Sud	772	1 365 027	984 354	380 673	19 053 062
SÃO PAULO	238	1127 123	861 124	265 999	10 080 475
PARANÁ	76	98 219	47 338	51 881	2 654 403
SANTA CATARINA	97	56 791	51 092	5 699	1 749 369
RIO GRANDE DO SUL	361	111 894	24 800	87 094	4 569 785
Sud-ouest	77	12 572	8 258	4 314	1 990 969
MATO GROSSO	27	7 080	3 050	4 030	569 875
GOIAS	50	5 492	5 208	284	1 421 094
Total pour le Brésil	2284	2 805 527	2 173 226	632 301	57 226 432
Centrales hydrauliques	1754				
Centrales thermiques	1056				

Principales centrales électriques (au-dessus de 10 000 kW) — Numéro	Nom	Type	Puissance (en kW)
1	CUBATÃO	HYDR.	474 000
2	PEIXOTO (en construction)	»	400 000
3	CUBATÃO (souterraine en construct.)	»	390 000
4	NILO PEÇANHA (souterraine)	»	330 000
5	PIRATININGA	THER.	200 000
6	PAULO AFONSO (souterrain)	HYDR.	180 000
7	ILHA DOS POMBOS	»	162 000
8	FONTES	»	154 000
9	ITUPARARANGA	»	56 125
10	AVANHANDAVA	»	30 000
11	3A. CARVALHO	»	28 000
12	EDGARD SOUZA	»	26 170
13	PIRAQUÊ (à flottante)	THER.	25 000
14	PORTO ALEGRE	»	24 600
15	RECIFE	»	22 500
16	COTEGIPE	»	20 000
17	RASGÃO	HYDR.	18 560
18	AREAL	»	18 000
19	PRESIDENTE VARGAS	»	18 000
20	CHAMINE	»	16 000
21	3A. CARVALHO (agrandissement)	»	16 000
22	ARARAQUARA (1re construction)	THER.	16 000
23	CAPIVARI	»	15 400
24	25 DE JULHO	HYDR.	14 000
25	BAURÚ (en construction)	THER.	14 000
26	CAFANHOTO	HYDR.	12 880
27	AVANHANDAVA (en construction)	»	12 200
28	RESERVA-RIO LIGHT	THER.	12 000
29	ITATINGA	HYDR.	12 000
30	S. GONÇALO	THER.	11 500
31	RIO DE PEDRAS	HYDR.	11 080
32	SUDRES	»	10 800
33	CENTRAL	THER.	10 000
34	S. JERONIMO	»	10 000
35	» » (agrandissement)	»	10 000
36	CARIOBA	»	30 000
37	PIAU	HYDR.	27 000
38	ITUTINGA	»	12 000
39	TRES MARIAS (en construction)	»	500 000
40	5TO GRANDE 3 MD (en projet)	»	100 000
41	SALTO DE PARANAPANEMA (Rio)	»	60 000
42	DOURADA (en construction)		11 000

bénéfices réalisés grâce à la production et la distribution d'énergie, qui sont considérées comme des services d'utilité publique, sont assujettis à une réglementation et ne peuvent dépasser 10 pour cent. C'est pourquoi l'entreprise privée qui cherche toujours des investissements plus lucratifs et plus rapidement rentables a hésité par le passé à investir des capitaux, nécessairement importants, dans l'industrie de l'énergie électrique. Toutefois, la nation s'efforce maintenant d'accroître la mise en valeur de son immense potentiel hydroélectrique. Le gouvernement s'est joint aux efforts des grands concessionnaires, et les résultats de cette politique ne se sont pas fait attendre; ainsi, en 1950, la production était supérieure de 15 pour cent au niveau de 1939.

Mises à part quelques centaines de sociétés de moindre importance, dénommées « sociétés indépendantes », la production massive d'énergie électrique est le fait des groupes suivants :

1. Le groupe « Éclairage et énergie », comprenant : *a*) la Compagnie des tramways, d'éclairage et d'énergie de Sao Paulo; *b*) la Compagnie des tramways, d'éclairage et d'énergie de Rio de Janeiro.

2. Le groupe des entreprises électriques brésiliennes (Empresas eletricas Brasileiras).

3. La Compagnie hydroélectrique de Sao Francisco.

4. La Compagnie électrique centrale de Minas Gerais.

5. Les services publics de l'électricité de l'État de Rio Grande do Sul.

Le Brésil a souffert périodiquement d'une pénurie aiguë d'électricité provoquée par la rapidité du développement du pays. Dans la plupart des cas, cette pénurie a été aggravée par de longues périodes de sécheresse.

Quatre facteurs ont surtout contribué à la progression géométrique de la demande d'électricité au Brésil : 1) la rapidité avec laquelle se sont formés les grands centres urbains; 2) l'accroissement des populations urbaines; 3) le développement industriel; 4) la demande d'électricité dans les campagnes.

Tous ces facteurs sont des phénomènes naturels dans la vie d'une jeune nation, dont les principales difficultés sont dues à un accroissement trop rapide. Si la demande continue d'augmenter au taux actuel de 10 pour cent, le pays aura besoin dans 10 ans de 5 900 000 kW de puissance supplémentaire qu'il devra produire dans ses centrales hydrauliques.

Les approvisionnements actuels pourraient être rapidement augmentés d'un million de kilowatts par la construction de barrages et de bassins d'accumulation.

COÛT DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE AU BRÉSIL

Dans les années qui ont suivi 1930, le gouvernement a institué un contrôle strict des tarifs de lumière et de force. Les pouvoirs publics se sont efforcés de maintenir les tarifs à un niveau raisonnable, à une époque où les prix de presque tous les biens enregistraient de fortes hausses de caractère inflationniste. De ce fait, la consommation d'énergie a augmenté à un rythme sans précédent.

L'augmentation de la demande d'énergie n'a pas été limitée à l'industrie et aux transports, peut-être fut-elle même plus nette à la consommation domestique, où le prix du courant ne fut pas fixé à un niveau qui, permettant de prévenir le gaspillage, aurait permis de disposer d'excédents pour l'industrie et les transports. Il faut ajouter que cet état de choses ne pouvait inciter les consommateurs à répartir plus rationnellement leur consommation d'électricité et à diminuer ainsi les charges de pointe.

En même temps, l'expérience acquise au cours de la seconde guerre mondiale nous avait montré combien est instable la situation d'une économie dont les transports et l'industrie demeurent tributaires des importations de combustible parce que le pays a été trop lent à mettre en exploitation les sources naturelles de combustible dont il dispose.

Avant l'invention du moteur diesel, l'électrification des chemins de fer présentait des avantages du point de vue économique même dans les régions où le trafic n'est pas très dense. C'est pourquoi certaines lignes de chemins de fer brésiliennes ont été électrifiées; dans les grandes villes telles que Sao Paulo, Belo Horizonte et Niteroi, des services de trolleybus ont été mis sur pied.

La coût de la production d'énergie, d'origine hydraulique ou thermique, dépend essentiellement de l'emplacement de la centrale. Le coût du combustible brûlé dans les centrales thermiques est de beaucoup inférieur, cela va de soi, dans les centrales construites à proximité des mines de charbon ou encore près de la côte où le combustible importé est relativement moins coûteux qu'il ne l'est pour des centrales construites à l'intérieur du pays.

D'autre part, le coût de l'énergie hydraulique dépend des conditions locales, l'aménagement de centrales hydrauliques en certains sites entraînant des dépenses beaucoup plus élevées que dans d'autres.

Toutefois, on peut dire, d'une façon très approximative, que dans une centrale moderne le coût de l'énergie thermique pour un taux d'utilisation à la centrale de 50 pour cent serait d'environ 0,50 cruzeiro par kilowattheure, soit 2,5 cents des États-Unis au taux de change de 20 cruzeiros pour 1 dollar des États-Unis. Les éléments de ce coût sont les suivants :

	Cruzeiros
Combustible	0,20
Main-d'œuvre	0,03
Entretien	0,05
Divers	0,01
Amortissement	0,05
Intérêts versés au titre des investissements	0,10
	0,50

Les investissements seraient de l'ordre de 7 000 cruzeiros par kilowatt, et l'on a fixé les amortissements à 3 pour cent et les dividendes à 10 pour cent. Dans les conditions actuelles, le prix le plus bas que l'on puisse escompter pour le courant d'une centrale hydraulique serait de 0,35 cruzeiros par kilowattheure, prix auquel on estime que la production de la centrale de Paulo Afonso pourra être vendue en bloc. Ceci justifierait donc l'investissement d'environ 12 000 cruzeiros par kilowatt, l'amortissement étant de l'ordre de 2 pour cent et les dividendes de 10 pour cent alors que 0,03 cruzeiro par kilowatt servirait à couvrir les frais de fonctionnement et d'entretien.

Les chiffres ci-dessus sont approximatifs, et il existe de nombreuses localités où l'énergie thermique revient moins cher que l'énergie hydraulique.

Rapport du coût de l'énergie électrique à la centrale et du prix de vente final aux consommateurs

D'une façon générale, le coût du transport et de la distribution s'élève en moyenne au double du coût de production. Les faits ont bien prouvé dans le monde entier, et l'expérience du Brésil l'a pleinement confirmé, qu'il est nécessaire d'investir au moins autant de capitaux pour la distribution et le transport de l'énergie que pour sa production, et que le coût d'exploitation par kilowattheure est beaucoup plus élevé, dans la plupart des cas, pour le transport et la distribution que pour la production. On enregistre également des pertes d'énergie considérables dans le transport et dans la distribution. Partant, une diminution de 30 pour cent du coût de production n'entraînerait qu'une diminution de 10 pour cent du prix de vente de l'énergie aux consommateurs. Pour le client utilisant l'énergie dans son ménage, cette diminution serait insignifiante, car la note d'électricité ne représente qu'un élément peu important du coût de la vie — environ 1 pour cent à Rio par exemple.

Pour les grands clients industriels, le coût de distribution est inférieur, et une diminution de 30 pour cent du coût de production de l'électricité pourrait entraîner une diminution allant jusqu'à 20 pour cent dans le prix de vente aux consommateurs. Mais, abstraction faite de cas exceptionnels, le coût de l'énergie ne représente qu'une faible fraction du coût total de la production industrielle — 2 pour cent dans la plupart des cas — de sorte que la diminution du prix de l'énergie n'influerait pas considérablement sur le coût de la production industrielle.

Étant donné que le Brésil est toujours menacé d'une inflation en dépit des grands efforts faits pour la prévenir, il semble inutile d'indiquer les tarifs actuels de l'électricité en monnaie brésilienne. On les exprimera peut-être mieux en production par heure d'ouvrier. Dans une certaine mesure, le prix de revient du kilowatt représente l'unité monétaire d'une centrale, tout comme le salaire horaire représente l'unité monétaire du travailleur.

Nous avons adopté cette équivalence et nous sommes arrivés au résultat suivant pour une compagnie d'électricité alimentant le public, de quelque nature que soit l'entreprise. Le tableau 4, par exemple, indique le nombre de kilowattheures correspondant au salaire d'un travailleur employé par la Compagnie des tramways, d'éclairage et d'énergie de Sao Paulo, pendant les années citées.

Tableau 4

Rapport entre le coût du kilowattheure et le nombre d'heures d'ouvrier

Année	Nombre d'heures d'ouvrier	Kilowatt-heures	Rapport
1905	1	0,8	100
1910	1	1,5	187
1920	1	2,6	325
1931	1	3,2	400
1941	1	4,4	550
1949	1	13,1	1 637

Inversement, nous pouvons mettre en regard le prix du kilowattheure payé par le travailleur en heures de travail et les salaires payés par les entreprises pendant la même année. Nous atteignons alors les chiffres cités au tableau 5.

Tableau 5

Rapport entre le nombre d'heures d'ouvrier et le coût du kilowattheure

Année	Nombre de kilowatt-heures	Minutes	Rapport
1905	1	75	100
1910	1	40	53
1920	1	23	30
1931	1	18,7	25
1941	1	13,7	18
1949	1	4,5	6

Le Brésil applique un système de tarifs multiples qui peut, en gros, se résumer en 2 points :

a) Les tarifs lumière, calculés selon un seul coefficient avec une somme forfaitaire minimum, qui augmente en proportion de l'électricité consommée;

b) Les tarifs force, calculés selon deux coefficients où la somme à payer est proportionnelle à la fois à la quantité consommée et à la charge connectée.

Voici un exemple concret de la méthode suivie pour l'établissement des tarifs. A supposer que :

i soit le capital investi, à savoir les sommes effectivement dépensées pour la centrale et représentant une contribution directe ou indirecte à la production et à l'aménagement des lignes de transmission et de distribution;

d représente le facteur d'amortissement des investissements ci-dessus (étant donné qu'il est impossible d'étudier chaque cas en particulier, les chiffres fournis par les sociétés d'exploitation sont mis à jour en les diminuant de 3 pour cent par an, lorsqu'il s'agit de centrales thermiques);

cm représente le fonds de roulement détenu en espèces ou sous forme de matériel de réserve, destiné aux paiements en espèces et aux services d'entretien (une marge pouvant atteindre 5 pour cent est admise pour ces dépenses).

Ainsi, le capital devant porter intérêt sera égal à la somme de : $i + cm - d = r$. Le produit de la vente doit être : $0{,}10\,r + 0{,}03\,i +$ dépenses diverses.

En adoptant cette équation pour un calcul de base des recettes, on règle tous les cas qui peuvent se présenter en établissant des taux différents pour les diverses classes de consommateurs. Le prix de l'énergie à basse tension, par exemple, est égal à 70 pour cent de la lumière électrique.

Les impôts frappant les entreprises de distribution d'énergie sont fixés par des lois, qui les exonèrent des impôts d'état et des impôts municipaux en vue d'assurer leur stabilité et leur équilibre financier. Par ailleurs, les concessions que le gouvernement accorde pour l'exploitation des services publics n'entraînent aucun transfert de droit de propriété. Le concessionnaire détient uniquement le droit d'usage et d'exploitation pendant une période donnée qui est fixée dans le contrat.

Nous pouvons indiquer ici les tarifs appliqués par l'une des principales entreprises productrices de courant-lumière et de force au Brésil et ceux que pratiquent des compagnies exerçant la même activité à l'étranger. Si l'on part de la valeur 1 dollar des États-Unis = 33,82 cruzeiros, on obtient les chiffres indiqués au tableau 6.

Il y a intérêt à remarquer qu'alors que le coût de la vie a augmenté de 500 pour cent depuis 1945, les tarifs de l'électricité ont marqué une hausse de 58 pour cent seulement pendant la même période, cette hausse couvrant uniquement les augmentations de salaires exigées par la main-d'œuvre de ce secteur (voir fig. 9).

Toutes les questions se rapportant à l'industrie de l'énergie électrique dans le pays sont réglementées par le Code brésilien des eaux, le gouvernement s'efforçant de soumettre toute l'énergie électrique, y compris les centrales thermiques, à un régime uniforme. C'est le Président qui accorde par décret toutes les concessions, après consultation du Département du service des eaux rattaché au Ministère

Tableau 6

Cours comparés du kWh à Rio de Janeiro, Sao Paulo et dans de grandes villes étrangères

Villes	Lumière électrique (cruzeiros par kWh)	Énergie (cruzeiros par kWh)
Sao Paulo, Brésil	0,80	0,29
Rio de Janeiro, Brésil . . .	1,14	0,33
New York, États-Unis d'Amérique.	1,69	0,99
Boston, États-Unis d'Amérique	1,76	0,74
Chicago, États-Unis d'Amérique	1,29	0,63
Paris, France	2,40	0,77
Montevideo, Uruguay . . .	1,11	0,88
La Paz, Bolivie	3,00	2,38
Caracas, Venezuela	3,99	2,18

de l'agriculture, et du conseil national des services des eaux et de l'énergie. Ces deux organismes gouvernementaux réglementent toutes les questions de tarifs qui peuvent se poser dans ce domaine. En vue de maintenir les tarifs de vente à un niveau raisonnable et d'empêcher qu'ils ne donnent lieu à des bénéfices excessifs, la loi brésilienne fixe un

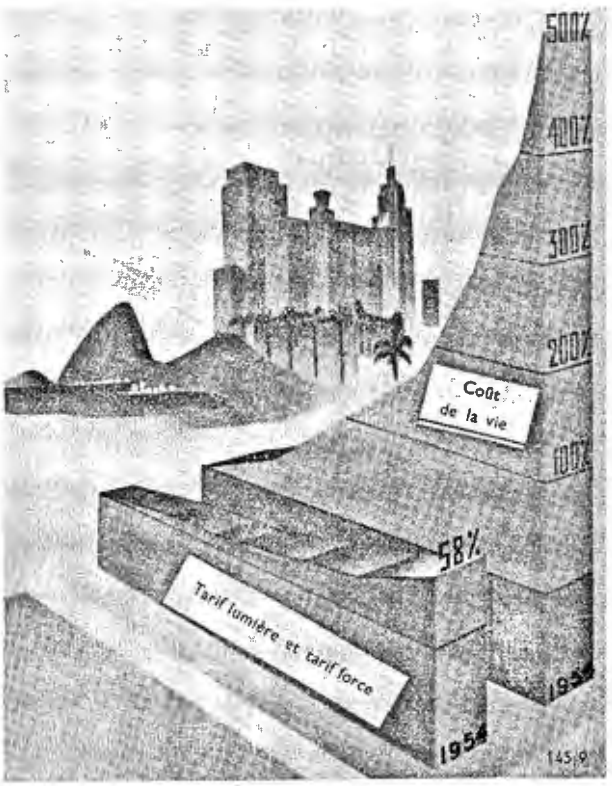


Figure 9. — Le tarif lumière et le tarif force et l'augmentation du coût de la vie.

pourcentage donné pour les dividendes à payer sur les capitaux investis. Le code des eaux, fondé sur des principes universellement acceptés, a réellement été dicté par les besoins du pays.

Conclusions

Le Gouvernement brésilien est pleinement conscient de l'importance qui s'attache à produire en abondance et à bon marché l'énergie, base principale du développement économique de la Nation. En conséquence, le gouvernement a l'intention de mettre plus complètement en valeur les ressources hydrauliques du pays, d'une part en mettant en vigueur le code des eaux et, d'autre part, en exerçant un contrôle sévère sur les tarifs de l'énergie et de la lumière électrique.

En raison de l'immense superficie du territoire brésilien, de la diversité de ses aspects physiographiques, des progrès rapides et constants de la science moderne — qui ont fréquemment entraîné des modifications fondamentales et essentielles dans l'industrie hydroélectrique et ses services — il a fallu adopter des tarifs différentiels pour les divers types de centrales et les diverses zones d'exploitation.

Bien que le coût de la vie ait augmenté de 500 pour cent depuis 1945, le prix de l'énergie électrique a subi une hausse de 58 pour cent seulement, destinée uniquement à satisfaire aux exigences de la main-d'œuvre. Cependant, les tarifs peu élevés ont provoqué une augmentation excessive de la demande d'électricité destinée à la consommation des ménages au détriment de la production d'énergie destinée à l'industrie.

Dans les centrales thermiques modernes, qui ont un taux d'utilisation de 50 pour cent, le prix du kWh est de 0,5 cruzeiros, soit 2,5 cents des États-Unis au taux de change de 20 cruzeiros pour un dollar. Les investissements peuvent être calculés sur la base de 7 000 cruzeiros par kWh, dont 3 pour cent seront affectés aux amortissements et 10 pour cent au service des intérêts.

Dans les centrales hydrauliques, le coût de l'énergie par kWh est d'environ 0,35 cruzeiros, dans les conditions actuelles d'exploitation. Ce prix pourrait justifier l'investissement de 12 000 cruzeiros par kWh, avec 2 pour cent au titre des amortissements et 10 pour cent au titre des dividendes.

D'autre part, les frais de transport et de distribution de l'énergie atteignent près du double du coût de production.

Dans de grandes villes telles que Rio de Janeiro ou Sao Paulo, la facture mensuelle d'électricité s'élève à environ 1 pour cent du budget d'un ménage.

A l'exception de certains cas spéciaux, le coût de l'énergie électrique nécessaire à la production industrielle ne représente qu'une faible proportion des dépenses totales et ne dépasse pas 2 pour cent du budget.

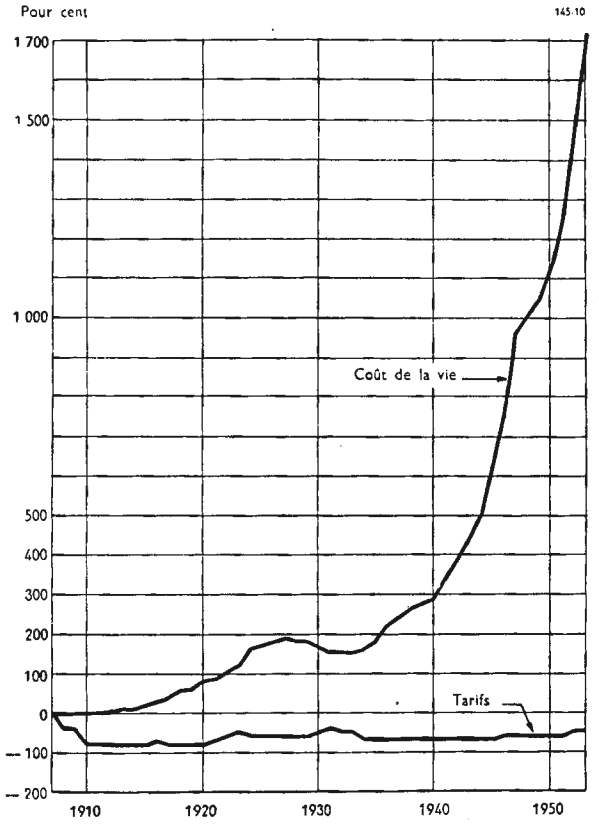


Figure 10. — Le coût de la vie et le tarif lumière dans le District fédéral, 1907-1953.

Il existe au Brésil d'assez nombreux tarifs de vente, mais la plupart d'entre eux ressortissent à deux catégories : *a*) les tarifs lumière; et *b*) les tarifs force.

Les impôts frappant les entreprises concessionnaires sont réglementés par la loi qui exonère ces dernières des taxes d'état et des taxes municipales, ce qui favorise leur stabilité et leur équilibre financier (fig. 10).

ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE AU BRÉSIL

On estime que le potentiel hydraulique du Brésil s'élève à 16 456 870 kWh. De plus, le pays dispose de certaines ressources en charbon et ses réserves de pétrole devraient se révéler de plus en plus abondantes, au fur et à mesure que la prospection se poursuit. Le Brésil manque néanmoins d'énergie directement utilisable, car l'emploi de l'énergie électrique ne peut être très répandu que lorsqu'elle est produite à un faible prix de revient. Les centrales exigent des investissements élevés, et l'énergie ne devient peu coûteuse que lorsqu'elle est consommée en quantités massives.

En raison de ces circonstances, ainsi que M. Steinmetz l'a fait remarquer, le Brésil se trouve enfermé dans un cercle vicieux, mais il est bien décidé à en sortir. Les circonstances mêmes qui exigent que les investissements nécessaires à la production d'énergie soient élevés, et qu'en même temps cette énergie soit vendue à bas prix pour pouvoir rendre service à l'économie, nous amène à conclure ce qui suit :

a) le loyer de l'argent qui doit être investi dans les entreprises électriques ne doit pas être élevé;

b) le produit des ventes d'énergie électrique ne peut être élevé.

Au Brésil, comme dans tous les autres pays du monde, on place de préférence les capitaux là où ils rapportent immédiatement. Ceci nous amène à une nouvelle constatation, à savoir qu'au Brésil, comme dans d'autres pays où l'esprit d'entreprise commence à se manifester et où les crédits bancaires pour l'industrie sont insuffisants, il devient chaque jour plus difficile d'attirer des capitaux privés vers la construction de nouvelles centrales électriques et l'installation de nouvelles lignes de transport et de distribution.

Étant donné que l'argent est rare et qu'il est difficile d'obtenir des crédits, les faibles capitaux disponibles cherchent d'autres placements qui laissent espérer des bénéfices immédiats. C'est pourquoi le gouvernement brésilien a établi le « Plano nacional de electrificaçao » (Plan national d'électrification) dont l'exécution devrait considérablement améliorer la situation de l'industrie électrique.

D'après les statistiques de 1954, la répartition des entreprises d'électricité au Brésil est la suivante :

	Puissance installée (en kW)	*Pour cent*
Centrales thermiques . . .	623 301	3,44
Centrales hydrauliques . .	2 173 226	96,56
	2 805 527	100,00

La production estimée pour 1954 était de 13 226 990 000 kWh, et la production moyenne par habitant de 354 kWh par an.

De vastes projets visant à augmenter la capacité de production sont déjà en cours de réalisation, et l'objectif à atteindre de 1953 à 1957 a été chiffré à environ 2 millions de kWh de puissance supplémentaire.

Le gouvernement fédéral a pris d'importantes mesures en vue de fournir des moyens suffisants pour réaliser un vaste plan d'électrification qui complètera la tâche des entreprises privées. C'est à cette préoccupation que répondent les lois créant le fonds fédéral d'électrification ainsi qu'une autre loi portant création d'un impôt général sur l'énergie et fixant le pourcentage et les modalités de répartition du produit de cet impôt entre le gouvernement fédéral, les États, le district fédéral et les municipalités.

Les fonds ainsi réunis doivent, dans l'intention du législateur, donner au gouvernement fédéral les moyens nécessaires à la mise en œuvre du plan national d'électrification, entreprise de première importance dont la réalisation doit durer 10 ans et qui doit mettre le pays en possession de 8 500 000 kW de puissance installée, soit trois fois autant que la puissance actuellement existante. L'accroissement correspondant de la quantité d'énergie sera de 15 milliards de kWh.

Le plan devrait permettre : de combler le « déficit » de capacité de production qui n'a cessé de grandir depuis quelques années en raison de la demande; d'augmenter la puissance des centrales de telle façon qu'en 1965 il soit possible de faire face aux besoins normaux d'une industrie de l'électricité bien organisée; de relier par des interconnections les réseaux existant ou à créer, en accroissant par là le taux de rendement et leur marge de sécurité en cas d'accident; enfin, d'unifier les fréquences et de normaliser les voltages. En dernière analyse, il s'agit d'augmenter l'efficacité des services et de rendre possible la création d'une industrie de l'équipement électrique lourd.

D'après le plan, le Brésil serait divisé en deux vastes régions qui exigeraient chacune des réalisations et des travaux de nature différente : *a*) la région où il est possible d'exploiter dans des conditions avantageuses de grandes centrales interconnectées; *b*) la région où seules de petites centrales indépendantes ou d'intérêt purement local seraient rentables. Dans la zone à population dense qui s'étend du nord-est à l'extrême sud du Brésil, les conditions dominantes de la demande et de l'offre justifient pleinement l'expansion de la production d'énergie électrique et, à la fin de la première période de 10 ans, 3 grands groupes de production devraient être en pleine exploitation :

1. Le premier, comprenant les centrales existantes — qui devraient être développées et dont le rayon devrait être élargi — situées dans la région centre-est qui s'étend de Espirito Santo et Minas Gerais jusqu'à Santa Catarina, où il existe du charbon en quantité suffisante pour constituer une source d'énergie.

2. Le second a pour centre la Compagnie hydro-électrique de Sao Francisco, et s'étend de l'État de Parahiba au sud des États de Ceará et Bahia.

3. Enfin, le troisième groupe les centrales hydrauliques et thermiques de l'état de Rio Grande do Sul.

De plus, un groupe isolé constituera une quatrième zone formée du « triângulo mineiro » au sud de l'État de Minas Gerais et de l'État de Goiás, et ayant pour source d'énergie les cascades de Dourada sur le fleuve Parahiba.

On estime qu'en 1965, ces diverses entreprises situées dans la zone de distribution des grandes centrales électriques représenteront une concentration de puissance installée de 8 millions de kW, et que les réseaux seront reliés entre eux par des lignes d'alimentation et de distribution.

Tableau 7

Production d'énergie

Sources	1940				1946				1952			
	Tonnes	Calories	Milliards de calories	Pour cent	Tonnes	Calories	Milliards de calories	Pour cent	Tonnes	Calories	Milliards de calories	Pour cent
Bois	41 600 000	4 000	166 400	83,81	55 610 000	4 000	222 440	83,47	78 650 000	4 000	316 400	77,62
Charbon de bois	230 000	7 000	1 610	0,81	1 000 000	7 000	7 000	2,63	750 000	7 000	5 250	1,24
Houille extraite au Brésil	1 336 000	5 000	6 680	3,36	1 897 000	5 000	9 485	3,56	2 000 000	5 000	10 000	2,47
Houille importée	1 209 000	7 000	9 672	4,87	1 071 000	7 000	7 497	2,81	915 370	7 000	6 408	1,58
Essence importée	368 000	11 000	4 048	2,04	624 000	11 000	6 864	2,58	2 407 000	11 000	26 477	6,53
Gas-oil importé	694 000	10 500	7 287	3,67	810 000	10 500	8 505	3,19	3 181 000	10 500	33 400	8,25
Alcool anhydre	37 230	7 000	261	0,13	102 000	7 000	714	0,27	287 850	7 000	2 015	0,50
Pétrole extrait au Brésil	5 000	10 500	52	0,03	8 700	10 500	91	0,3	102 947	10 500	1 081	0,27
Énergie hydroélectrique consommée	—	861	2 514	1,28	—	861	3 875	1,46	—	861	6 027	1,49
a) en 1940 : 2 920 000 000 kWh												
b) en 1946 : 5 500 000 000 kWh												
c) en 1952 : 7 000 000 000 kWh												
TOTAL	—	—	198 524	100	—	—	266 471	100	—	—	405 258	100

Sources : Institut brésilien de géographie et de statistique; Institut du sucre et de l'alcool; Conseil national du pétrole; Services des statistiques économiques et financières du Ministère des finances du Brésil.

LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DE 1939 A 1952

A. B. de Oliveira, ingénieur et économiste, a fait récemment une étude intéressante de la consommation d'énergie électrique au Brésil entre 1939 et 1952. Nous avons adopté ces conclusions, parce qu'elles dépeignent très exactement la situation. On admet unanimement au Brésil qu'il est de la plus extrême importance d'exécuter un programme efficace visant à accélérer le développement économique du pays. Cela n'est réalisable qu'au prix d'une politique d'investissements conçus pour porter remède aux deux principales difficultés, qui sont les importations et la pénurie de capitaux.

L'approvisionnement en électricité est un élément essentiel de la situation économique d'un pays, quelqu'il soit, puisque le courant de la production nationale en dépend. Une étude de la consommation d'énergie au Brésil depuis 14 ans donne une représentation exacte, quoique indirecte, de la situation économique du pays.

Le présent rapport traite de toutes les sources d'énergie, et tient compte du remplacement fréquent d'une forme d'énergie par une autre. Cependant, il laisse de côté l'énergie animale, humaine ou hydraulique, toutes les fois qu'elle n'est pas transformée en électricité. Nous avons considéré ici l'électricité du point de vue du consommateur; autrement dit la quantité d'énergie portée sur les tableaux ci-joints est celle que les consommateurs ont à leur disposition. S'il fallait la considérer du point de vue du producteur, les chiffres cités seraient plus élevés puisqu'ils comprendraient les pertes en cours de production et de distribution.

Un bilan de ce genre prêtera toujours à controverse sur un certain nombre de points, parce que les sources et les types d'énergie, ainsi que leur utilisation, varient très largement. Nous nous sommes donc efforcés ici d'uniformiser les différents types en les exprimant tous en kWh. Une telle normalisation aura naturellement, comme toute autre, des limites qu'il sera aisé de définir; mais si l'on préférait exprimer les différents types en termes d'unités de chaleur, on aboutirait aux mêmes inexactitudes.

Certaines simplifications sont inévitables dans un bilan de ce genre. Nous avons attribué un taux de rendement de 20 pour cent à tous les combustibles en convertissant leur pouvoir calorifique en kWh *, sauf pour le bois, où l'on a pris 5 pour cent comme taux moyen de rendement.

Lorsqu'il s'agit d'énergie électrique consommée, les chiffres représentent les kWh vendus au consommateur.

Nous avons donc essayé de représenter l'énergie consommée par son équivalent en puissance installée, tout en sachant bien qu'une partie du combustible est utilisée pour produire non pas de l'énergie mécanique ou électrique mais de la chaleur utilisée à diverses fins, comme on le voit par exemple dans la sidérurgie. Cette partie représente naturellement un rendement supérieur à 20 pour cent (de 50 à 70 pour cent); d'autre part, lorsqu'on l'applique à d'autres usages, le rendement moyen tombe au-dessous de ces chiffres. Dans les transports, par exemple, il est de 5 pour cent pour les locomotives chauffées au charbon, de 2 pour cent pour les machines chauffées au bois et de 18 pour cent pour les automobiles.

Le tableau 8 exprime les résultats de notre étude en millions de kWh pour chaque type de combustible et également pour l'énergie électrique. Le tableau 9 montre l'ampleur des variations constatées dans l'utilisation de chaque type d'énergie.

La consommation totale d'énergie s'est élevée de 18 milliards de kWh en 1939 à 35 milliards en 1952; elle est demeurée à peu près stationnaire pendant la guerre, alors que le charbon et le bois brésiliens remplaçaient le combustible importé précédemment. A cette époque, la consommation de bois est passée de l'indice 100 en 1939 à l'indice 120 en 1944, pour revenir à l'indice 89 en 1952. Les combustibles liquides étaient descendus à l'indice 94 en 1942, l'essence arrivant à l'indice 55 en 1943. Dès la fin de la guerre, les indices de ces combustibles sont remontés pour atteindre respectivement 463 et 549 en 1952.

On verra à la figure 11 comment se répartit, en pourcentages, la consommation d'électricité selon les sources d'énergie. L'accroissement du pourcentage revenant aux combustibles liquides se traduit par les chiffres suivants : 17 pour cent en 1939 contre 41 pour cent en 1952; de même, le pourcentage revenant aux combustibles solides est tombé de 71 à 40 pour cent au cours de la même période.

L'état de guerre a imposé une réduction importante de l'utilisation des combustibles liquides, qui ne représentaient plus que 15 pour cent du total en 1944. Le pourcentage du bois utilisé a, au

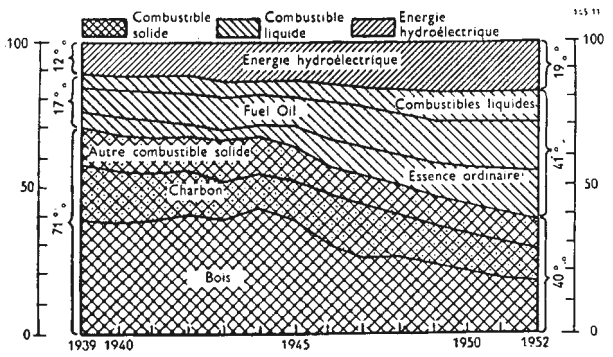


Figure 11. — Brésil : Consommation annuelle, répartition en pourcentage d'énergie.

* Le même critère a été adopté dans « Energy Resources of the World ».

Tableau 8

Consommation d'énergie de 1939 à 1952 (en millions de kWh)

Sources d'énergie	1939	1940	1941	1942	1943	1944	1945	1946	1947	1948	1949	1950	1951	1952
A. Toutes les sources réunies	18 405	19 097	19 490	18 625	20 668	20 496	21 769	22 093	24 739	25 958	27 125	30 398	32 717	35 331
B. Combustibles liquides . .	3 157	3 522	3 714	2 982	3 914	3 050	3 704	5 251	6 560	7 395	8 720	10 961	12 439	14 617
Essence aviation	27	30	41	106	189	91	120	164	246	283	314	359	406	407
Essence ordinaire	989	1 065	1 119	707	542	658	933	1 787	2 138	2 573	3 085	3 774	4 534	5 430
Pétrole lampant	283	283	330	197	170	187	225	333	372	423	522	638	715	859
Gas-oil	362	387	400	314	329	463	438	540	794	1 015	1 174	1 671	1 699	2 154
Fuel-oil	1 448	1 717	1 721	1 567	2 606	1 561	1 893	2 377	2 943	3 008	3 537	4 507	5 052	5 704
Autres [a]	48	40	103	91	78	90	45	50	67	88	88	12	33	63
C. Combustibles solides . . .	12 934	13 019	12 996	12 620	13 526	13 899	14 350	12 740	13 681	13 553	12 861	13 587	13 974	14 055
Houille	3 556	3 472	3 221	2 728	2 906	2 560	3 165	3 702	4 671	3 883	3 472	3 940	3 752	3 704
Houille extraite au Brésil	985	1 221	1 252	1 581	1 813	1 645	1 833	1 710	1 746	1 869	1 957	1 791	1 761	1 928
Houille importée	2 571	2 251	1 969	1 147	1 093	915	1 332	1 992	2 925	2 014	1 515	2 149	1 991	1 776
Bois [b]	7 171	7 123	7 345	7 585	7 947	8 615	8 333	6 775	6 470	6 770	6 598	6 732	6 778	6 362
Déchets de canne à sucre	1 004	1 166	1 142	1 120	1 103	1 164	1 150	1 343	1 508	1 803	1 740	1 675	1 938	2 211
Charbon de bois	1 253	1 258	1 288	1 187	1 570	1 560	1 702	920	1 032	1 097	1 051	1 240	1 506	1 778
D. Énergie hydraulique . . .	2 264	2 556	2 780	3 023	3 228	3 547	3 715	4 102	4 493	5 010	5 544	5 850	6 304	6 659

Sources : Banque nationale pour le développement économique.

[a] Y compris le pétrole utilisé pour la production de gaz, l'huile à brûler et l'alcool incorporé aux carburants composés.

[b] Non compris le bois utilisé pour la production de charbon de bois.

Tableau 9

Consommation d'énergie de 1939 à 1952 (1939 = 100)

Sources d'énergie	1939	1940	1941	1942	1943	1944	1945	1946	1947	1948	1949	1950	1951	1952
A. Toutes les sources réunies	100	104	106	101	112	111	118	120	134	141	147	165	178	192
B. Combustibles liquides . .	100	112	118	94	124	97	117	166	208	234	276	347	394	463
Essence aviation	100	111	153	393	700	338	445	605	911	1 048	1 159	1 329	1 502	1 505
Essence ordinaire	100	108	113	72	55	67	99	181	216	260	312	382	458	549
Pétrole lampant	100	100	117	70	60	66	79	118	132	151	185	226	253	304
Gas-oil	100	107	111	87	91	128	121	149	219	280	324	462	469	595
Fuel-oil	100	119	119	108	180	108	131	164	203	208	244	311	349	394
Autres [a]	100	86	214	187	160	186	94	103	138	182	181	25	68	131
C. Combustibles solides . . .	100	100	100	97	104	107	111	98	105	104	99	105	108	108
Houille	100	98	91	77	82	72	89	104	131	109	93	111	106	104
Houille extraite au Brésil	100	124	127	161	184	167	186	174	177	190	199	182	179	196
Houille importée	100	88	77	45	42	36	52	77	114	78	59	84	77	69
Bois [b]	100	99	102	106	111	120	116	94	90	94	92	94	95	89
Déchets de canne à sucre	100	116	114	112	110	116	115	134	150	180	173	167	193	220
Charbon de bois	100	100	103	95	125	123	136	73	82	88	84	99	120	142
D. Énergie hydraulique . . .	100	113	123	134	143	157	164	181	199	221	245	258	278	294

Sources : Banque nationale pour le développement économique.

[a] Y compris le pétrole utilisé pour la production de gaz, l'huile à brûler et l'alcool incorporé aux carburants composés.

[b] Non compris le bois utilisé pour la production de charbon de bois.

Tableau 10

Consommation d'énergie de 1939 à 1952

Sources d'énergie	Unités	1939	1940	1941	1942	1943	1944	1945	1946	1947	1948	1949	1950	1951	1952
A. Combustibles liquides :															
Essence aviation	10^6 l	15,6	17,4	23,8	61,2	109,0	52,6	69,3	94,2	141,9	163,2	280,6	207,0	224,0	234,4
Essence ordinaire	10^6 l	543,5	585,1	614,9	388,5	298,1	361,8	539,9	982,0	1 174,4	1 413,5	1 694,8	2 073,4	2 491,1	2 983,5
Gas-oil	10^3 t	146,5	156,7	162,0	126,9	133,3	187,3	177,4	218,5	321,6	410,9	475,2	676,3	687,7	871,9
Pétrole lampant	10^6 t	142,2	142,5	165,8	99,3	85,5	93,8	113,0	167,7	187,1	215,4	262,5	320,8	359,8	432,2
Fuel-oil	10^3 t	586,2	695,0	696,6	634,3	1 054,9	631,9	766,6	962,3	1 191,6	1 217,6	1 432,1	1 824,8	2 045,5	2 309,5
Autres :															
Alcool plus essence	10^6 l	—	—	72,7	60,6	19,4	25,9	11,5	12,2	46,1	59,5	61,2	11,4	19,1	61,3
Huile à brûler		—	—	—	—	—	—	349,0	206,0	181,0	207,0	119,0	193,0	294,0	287,0
Pétrole utilisé dans la production de gaz	10^6 t	19,6	16,2	12,1	11,7	23,4	25,7	13,3	15,0	7,8	10,9	10,1	—	5,2	—
B. Combustibles solides :															
Charbon extrait au Brésil	10^3 t	820,1	1 014,8	1 031,9	1 298,7	1 461,4	1 318,1	1 451,0	1 355,5	1 356,2	1 454,1	1 514,8	1 340,7	1 370,0	1 500,4
Charbon importé	10^3 t	1 382,5	1 210,2	1 058,3	616,6	587,4	492,1	715,8	1 071,0	1 572,7	1 082,9	814,5	1 155,6	1 070,7	954,9
Bois [a]	10^3 m^3	88 351,0	87 759,0	90 496,0	93 446,0	97 903,0	106 137,0	102 688,0	83 475,0	79 713,0	83 414,0	81 289,0	82 939,0	83 511,0	78 383,0
Déchets de canne à sucre	10^3 t	2 182,3	2 534,1	2 482,5	2 434,5	2 396,9	2 531,3	2 500,5	2 920,5	3 728,8	3 920,4	3 783,0	3 640,8	4 213,3	4 806,2
Charbon de bois	10^3 t	720,0	722,5	740,4	681,9	902,4	896,6	978,3	528,8	593,1	630,2	604,1	712,5	865,5	1 021,9
C. Énergie hydroélectrique	10^6kWh	2 264,1	2 555,8	2 780,4	3 022,9	3 228,0	3 546,6	3 714,7	4 102,3	4 498,1	5 009,8	5 554,2	5 850,2	6 303,5	6 658,9

Sources : Institut brésilien de géographie et de statistique et Banque nationale pour le développement économique.

[a] Excepté le bois consommé pour la production de charbon de bois.

contraire, atteint jusqu'à 42 pour cent en 1949 pour retomber à 18,8 pour cent en 1952.

Les grands projets hydrauliques et thermiques déjà en cours d'exécution rendront à l'électricité sa position prédominante.

En étudiant la période ci-dessus, il ne paraît pas hors de propos d'examiner les secteurs de production du pays, étant donné qu'une fraction importante de l'électricité produite est utilisée pour la production et la transformation de marchandises et pour le transport des denrées alimentaires, des matières premières et des biens de consommation.

Il y a lieu également de tenir compte des grands centres de population où l'activité est de caractère essentiellement urbain.

La solution la plus simple, même si sa valeur est limitée, consiste à calculer la consommation d'énergie par unité de production effective, de la manière dont on procède dans le calcul des coefficients physiques.

Dans les pays très développés, les consommations de combustible par unités de production tendent à diminuer à mesure que l'unité d'énergie est utilisée avec un rendement plus élevé. Cependant, tel n'est pas le cas au Brésil, car si les progrès de la technique provoquent une baisse des quantités d'énergie utilisées, de nouvelles demandes d'énergie se manifestent d'autre part.

La figure 12 illustre le rapport entre la consommation d'électricité, la production effective et la variation de la consommation d'électricité par unité de production effective (Banque pour le développement économique, Brésil). Elle montre que jusqu'en 1949 la consommation par unité de production est restée inférieure au niveau de 1939. De 1949 à 1951, elle est passée de 100 à 105, en raison d'une amélioration apportée à l'équipement industriel après la fin des hostilités, et de l'utilisation accrue de l'essence résultant de l'augmentation quantitative des transports routiers. La variation de la consommation par habitant se traduit par une augmentation de 42 pour cent par rapport à 1939.

Tableau 11

Consommation d'électricité — Taux de conversion utilisé

Sources	Unités	Millions de kcal par unité	Millions de kWh par unité
A. Combustibles liquides :			
Essence aviation	Tonnes	10,6	2,47
	Milliers de litres	7,5	1,74
Essence ordinaire	Tonnes	10,6	2,47
	Milliers de litres	7,8	1,82
Pétrole lampant	Tonnes	10,6	2,47
	Milliers de litres	8,5	1,99
Gas-oil	Tonnes	10,6	2,47
	Milliers de litres	9,0	2,10
Fuel-oil	Tonnes	10,6	2,47
	Milliers de litres	10,3	2,41
Carburants ordinaires (alcool plus essence) . . .	Tonnes	5,5	1,28
	Milliers de litres	4,4	1,02
Autres produits pétroliers	Tonnes	10,6	2,47
	Milliers de litres	8,7	2,03
B. Combustibles solides :			
Charbon extrait au Brésil			
Rio Grande do Sul . . .	Tonnes	5,0	1,16
Santa Catarina	Milliers de litres	6,0	1,39
Charbon importé	Tonnes	8,0	1,86
Bois	Milliers de litres	4,0	0,23
Charbon de bois	Tonnes	7,5	1,74
Déchets de canne à sucre	Milliers de litres	2,0	0,46
C. Énergie électrique		—	1,00

Observations : Certains des taux ci-dessus sont empruntés à l'ouvrage intitulé « Energy Sources of the World », Washington, 1949. On a admis les taux de rendement suivants : 5 pour cent pour le bois, 100 pour cent pour l'énergie électrique (chiffre de consommation) et 20 pour cent pour les autres combustibles liquides et solides.

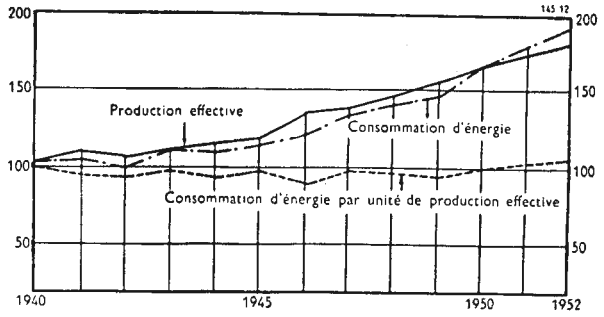


Figure 12. — Brésil : Données sur la consommation d'énergie, la production effective et la consommation d'énergie par unité de production, de 1940 à 1952. Année de base : 1930 = 100.

On verra au tableau 10 quelle est la part respective du combustible importé et du combustible produit dans le pays. Le tableau 11 donne le bilan énergétique du Brésil avec les taux de conversion utilisés.

Évaluation du développement futur des centrales du Brésil

Pour établir la figure 13, nous nous sommes servis de chiffres annuels montrant comment les charges horaires maxima — ou charges de pointe — ont augmenté depuis 15 ans dans les divers réseaux de distribution d'électricité du Brésil. Cette figure illustre la capacité de production qu'il faudra

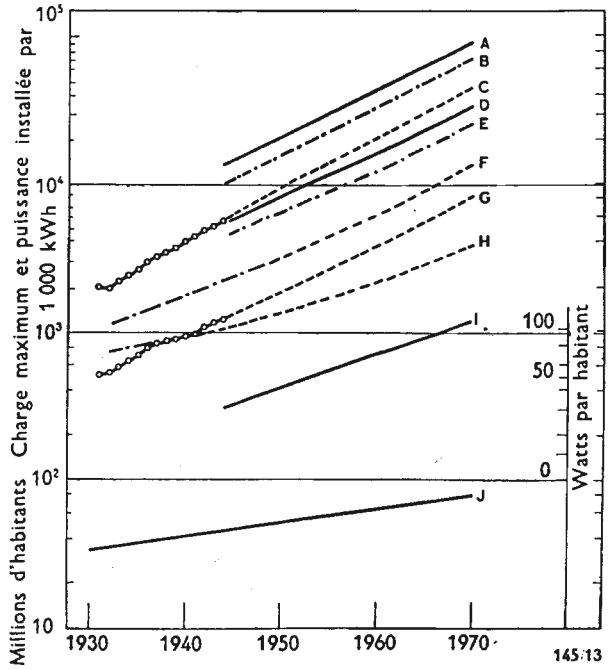


Figure 13. — Évaluation de la puissance à installer au Brésil, pour la période 1944-1970.

installer au Brésil d'ici 1970. Nous avons pris pour base le taux d'accroissement indiqué au tableau 12.

Tableau 12

Évaluation du développement futur des centrales

Groupe de réseaux	Taux d'accroissement précédent	Taux d'accroissement futur		
		1944-1950	1950-1960	1960-1970
Réseaux d'une puissance installée de plus de 30 000 kW en 1944	8,7	9,0	8,5	8,0
Douze réseaux d'une puissance installée de plus de 1 000 et de moins de 30 000 kW en 1944	7,2	7,0	7,5	8,0
Autres réseaux d'une puissance installée de plus de 1 000 et de moins de 30 000 kW en 1944	6,0	6,0	7,0	8,0
Réseaux d'une puissance installée de 1 000 kW ou moins en 1944	4,0	4,0	5,0	6,0

Après avoir extrapolé les « charges de pointe » dans ces quatre groupes de réseaux, nous avons estimé la puissance installée de chacun d'eux en la considérant comme égale aux charges de pointe multipliées par 1,3. Les prévisions qui en résultent figurent au tableau 13.

Tableau 13

	1948	1958	1968
	kW	*kW*	*kW*
1. Puissance installée :			
Réseaux de plus de 30 000 kW	1 010 000	2 270 000	4 910 000
Réseaux de moins de 30 000 kW	710 000	1 370 000	2 840 000
TOTAL	1 720 000	3 640 000	7 750 000
2. Accroissement annuel:			
Réseaux de plus de 30 000 kW	73 000	193 000	392 000
Réseaux de moins de 30 000 kW	51 000	92 000	218 000
TOTAL	124 000	285 000	610 000

Il convient d'ajouter qu'en procédant à cette extrapolation nous avons utilisé un taux d'accroissement à peine plus élevé que ceux qui ont été

effectivement observés au cours des dix à quinze années précédentes. En fait, pour ce qui est des réseaux d'une puissance supérieure à 30 000 kW, nous avons utilisé des taux plus faibles, admettant par là que les grands réseaux du District fédéral et la ville de Sao Paulo avaient atteint leur développement maximum.

Cette prévision peut donc être considérée comme fondée sur des conditions « normales », c'est-à-dire sur l'hypothèse selon laquelle les facteurs qui ont déterminé le développement économique du pays au cours des dix ou quinze dernières années conserveront la même importance dans l'avenir. Il faut donc se rappeler que si, dans un avenir rapproché, un programme intensif d'industrialisation est exécuté au Brésil, les prévisions citées plus haut pourront se trouver dépassées dans une proportion qu'il est difficile d'envisager, car elle sera entièrement fonction du rythme auquel s'accélérera l'équipement industriel du pays.

Conclusion

L'électricité ne peut être assurée de trouver d'importants débouchés que là où elle est vendue à bas prix. Cependant, comme l'industrie de production d'électricité exige des investissements en capital considérables, le prix de vente du courant ne peut pas être fixé très bas à moins que les ventes ne soient très importantes.

Actuellement le Brésil se trouve enfermé dans un cercle vicieux. Il doit développer sa production d'électricité, mais ne peut le faire faute de capitaux. Il s'efforce néanmoins de surmonter cette difficulté par tous les moyens.

A cette fin, un « Fonds fédéral d'électrification » a déjà été créé, et un « Plan national d'électrification » mis sur pied.

Une étude de la consommation d'électricité au Brésil depuis quatorze ans, dans laquelle on a admis un taux de rendement de 20 pour cent dans la transformation de l'énergie thermique en électricité (à l'exception du bois, pour lequel un taux de 5 pour cent a été admis), a révélé que la consommation de courant par habitant s'est accrue de 42 pour cent par rapport à 1939.

Quant au développement futur de l'industrie de l'électricité au Brésil, nous admettons qu'un taux d'accroissement de 8 pour cent pourrait être envisagé pour les réseaux existants d'une puissance de 30 000 kWh.

La production d'électricité du pays s'élevait à 13 226 990 000 kWh en 1954. La production moyenne par habitant était de 254 kWh.

Pour nous résumer, insistons encore sur la nécessité urgente et absolue de développer notre production d'électricité afin de favoriser l'extension rapide de l'industrie nationale.

LES RÉSERVES D'ÉNERGIE DU BRÉSIL

Dans sa *Géographie de l'énergie*, M. Pierre George, professeur à la Sorbonne, explique que les marchés de l'énergie sont caractérisés non seulement par leur valeur mais aussi par la nature des combinaisons d'énergie qui peuvent être réalisées, celles-ci exerçant une influence décisive sur le prix moyen de la production. La quantité proportionnelle de charbon, de pétrole, de gaz naturel et d'énergie électrique consommée est déterminée par la situation des approvisionnements de chaque pays.

De ce point de vue le professeur George classe les économies industrielles de la façon suivante :

1. Les économies réunissant toutes les sources d'approvisionnement, c'est-à-dire celles qui disposent de vastes réserves de charbon et de combustibles liquides, d'énergie hydraulique et de minerais radioactifs.

2. Les économies équilibrées à base de charbon, possédant de très importantes réserves de charbon qui leur suffisent à faire face à leurs besoins en énergie sauf en ce qui concerne les moteurs à combustion interne. Les économies de ce type doivent en général importer des combustibles liquides et exporter du charbon en contrepartie.

3. Les économies pauvres en charbon, dont les réserves ne suffisent pas aux besoins de l'industrie. Ici, il devient nécessaire d'importer des produits pétroliers et aussi le complément de charbon, et de chercher à exploiter toutes les autres sources d'énergie offrant des possibilités et notamment l'énergie hydraulique.

4. Les économies à base d'énergie hydraulique, dont le fonctionnement repose sur l'électricité tirée des ressources hydrauliques du pays, le complément étant fourni par des importations très coûteuses de combustibles fossiles.

Tout pays hautement industrialisé appartient à l'une ou à l'autre de ces catégories. Le professeur George appelle « économies attardées » les pays dont l'économie repose encore sur une production utilisant l'effort musculaire de l'homme ou de l'animal.

Examinons le Brésil de ce point de vue. Laissant de côté l'énergie musculaire qu'il serait difficile d'évaluer, les sources principales d'énergie dont dispose le Brésil sont le bois, le charbon, le pétrole et ses sous-produits, et la force hydraulique.

Bois

Le bois est depuis longtemps la source principale d'approvisionnement en énergie du pays. Il convient cependant de ne négliger aucun effort pour en trouver une autre qui soit d'un meilleur rendement et dont la consommation produise des effets moins nuisibles, car l'utilisation du bois se traduit par la dévastation des forêts. Le bois, avec son sous-produit, le charbon de bois, a représenté les pourcentages suivants dans le bilan énergétique du pays : 85 pour cent en 1940, 86 pour cent en 1946 et

79 pour cent en 1952. Il est donc encourageant de noter une baisse de la consommation de bois.

Le volume utilisé demeure néanmoins très considérable. Si chaque tonne de bois correspond approximativement à 2,5 m^3, et si chaque tonne de charbon de bois représente une consommation de 10 m^3 de bois, on voit qu'environ 227 millions de m^3 de bois ont été consommés en 1952.

Considérant qu'un hectare d'excellente forêt produit environ 180 m^3 de bois, et prenant un rendement moyen de 100 m^3 de bois à l'hectare, on est amené à conclure qu'il a fallu déboiser environ 2 270 000 hectares de réserves forestières. On a évalué la superficie totale des réserves à environ 257 000 000 d'hectares. Ainsi la consommation actuelle correspond-elle à environ 1 pour cent des réserves forestières du Brésil, qui s'étendent sur une surface de 4 500 000 km^2 et contiennent une richesse de matières premières que l'on ne trouverait nulle part ailleurs dans le monde.

Le professeur Nicolau Vavilov, de l'Université Cornwall, qui fait autorité en matière d'économie agricole, s'est exprimé en ces termes sur la valeur de nos forêts : « La richesse forestière du Brésil est sans égale, qu'il s'agisse de la qualité ou de la quantité; on peut même dire que la sylviculture a la même importance que l'agriculture dans ce pays. »

Selon la systématique d'Engler, la flore brésilienne comprend deux grandes régions géobotaniques, caractérisées par : la flore amazonienne (Brésil hyléen), la flore générale (reste du pays).

La zone de la flore amazonienne est comprise dans la vaste ceinture de forêts équatoriales qu'Humboldt a appelée « hyléenne »; quant à la flore générale, elle s'étend au-delà des frontières du Brésil, dans les pampas et les savanes. Le professeur Gonzague de Campos, dans sa carte forestière du Brésil, distingue quatre types différents de régions boisées : *a*) les forêts de la zone équatoriale; *b*) les forêts de la côte atlantique; *c*) les forêts de l'arrière pays (régions à fortes précipitations); *d*) les forêts marginales.

Les forêts marginales se présentent sous la forme de terrains herbeux et d'arbustes le long des cours d'eau, et leur largeur varie de quelques mètres à plusieurs kilomètres. On trouve des taillis et des terrains herbeux au centre du Brésil, et plus loin, vers le nord-est, la « castinga » caractérisée par une végétation maigre, adaptée au sol desséché. Ces diverses régions n'ont qu'une faible valeur économique. Même le bois que l'on en tire ne fournit que 70 pour cent de l'énergie libérée par le bois des forêts, comme on l'a constaté en l'utilisant pour chauffer les locomotives.

Le développement de la sidérurgie dans l'État de Minas Gerais a fait de cet État le plus gros consommateur de bois du Brésil, les conditions locales ayant conduit à installer de préférence des hauts fourneaux à charbon de bois. Les métallurgistes considèrent le charbon de bois comme le combustible le plus pur. La fonte qu'il produit est de toute première qualité et sa teneur en phosphore et en soufre est faible.

Tourbe

Elle vient en tête parmi les combustibles fossiles. D'abondantes réserves existent dans les États de Bahia et Espirito Santo; son pouvoir calorifique est faible, cependant. Dans l'État de Bahia, les tourbières de formation assez récente sont appelées « marahuitos ». Ce sont des restes d'algues microscopiques que l'on trouve dans le plancton des lacs d'eau douce. Pendant la saison sèche, l'eau des lacs peu profonds s'évapore, exposant des fonds de vase composés de ces algues. Dans l'État de Bahia où on les trouve en abondance, il est possible d'organiser une production rentable de ces « marahuitos », non seulement pour produire de la chaleur mais aussi pour en extraire de la cire « montana » à l'aide de solvants. On en tire aussi des huiles par distillation.

Lignites

Les lignites se rencontrent en divers endroits du Brésil. Leur exploitation n'a pas encore été entreprise en raison du fait que les réserves les plus importantes sont situées loin des centres industriels.

Le lignite extrait à proximité des grands centres est de médiocre qualité. Il ne sèche et ne s'agglutine qu'au prix d'opérations difficiles et coûteuses. Sa teneur en cendres est élevée (24 pour cent) ainsi que sa teneur en eau (18 pour cent) et son pouvoir calorifique est de l'ordre de 3 500 à 4 500 calories.

Schistes bitumineux

La structure chimique des produits obtenus par distillation de ces schistes est celle d'hydrocarbures du même type que le pétrole extrait des puits, d'après les résultats obtenus par l'American Society for Testing Materials (ASTM). En réalité, ces hydrocarbures appartiennent dans une large mesure aux séries non saturées, à l'encontre de ceux qui composent le pétrole des puits et où prédominent les séries saturées du type C_nH_{2n+2}.

Selon qu'ils produisent des huiles de pétrole par la méthode des solvants ordinaires ou par un procédé de distillation différenciée, les schistes bitumineux ont été classés différemment par les géologues. Les premiers sont appelés « schistes bitumineux » et les autres « schistes pyro-bitumineux ». L'expression « schistes bitumineux » est employée indifféremment au Brésil pour les uns et les autres.

Il existe un gisement de schistes bitumineux d'une étendue de 200 km^2 commodément situé dans la vallée de la Parahiba. Un réseau très dense de voies ferrées y relie les plus grands centres industriels du Brésil : Sao Paulo et Rio de Janeiro. Ce gisement suffit à pourvoir aux besoins du pays en pétrole indigène pendant plus de cinquante ans.

Les schistes mous sont les plus fréquents. Leur teneur en pétrole varie de 3 à 25 pour cent, mais leur teneur en eau est élevée (de 25 à 30 pour cent). Une distillerie pouvant produire 10 000 barrels * par jour est en cours de construction et traitera les schistes du Parahiba, dont la capacité totale est de l'ordre de 2 milliards de barrels.

On trouve encore des schistes bitumineux en d'autres endroits du Brésil, notamment dans la région qui s'étend de Sao Paulo à l'extrême Sud du pays, où existent des gisements très importants.

Charbon

On a évalué à 5 milliards de tonnes les réserves de charbon du Brésil. Les charbons bitumineux de qualité médiocre prédominent, et leur pouvoir calorifique moyen est de 5 000 calories par kg, soit 9 000 Btu par livre avoirdupois. Malheureusement, les bassins houillers sont situés à de grandes distances de nos principaux centres industriels.

Il existe d'importants gisements dans les trois États méridionaux de Rio Grande do Sul, Paraná et Santa Catarina. Dans ce dernier État, le charbon est utilisé pour produire le coke nécessaire à la sidérurgie. Le charbon découvert jusqu'ici dans le nord est anthraciteux.

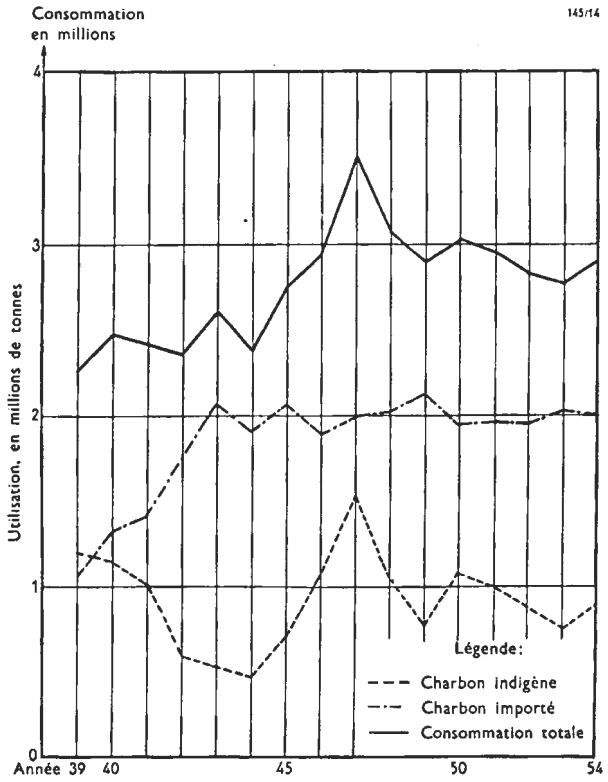


Figure 14. — La consommation de charbon au Brésil.

La consommation de charbon indigène et importé (fig. 14) s'élève au total à environ 3 millions de tonnes par an au Brésil. En 1940, le charbon a fourni 8,2 pour cent de l'énergie consommée dans la production totale d'électricité, contre 4,1 pour cent seulement en 1952. La production indigène représente les deux tiers de notre consommation totale. Il nous reste donc environ un million de tonnes par an à importer.

Les utilisations du charbon importé au Brésil sont les suivantes :

	Pour cent
Chemins de fer	60
Navigation	18
Gaz de ville	16
Autres	6

En 1953, le Gouvernement fédéral a institué le « Plan national du charbon » en vue de porter à 4 millions de tonnes la production indigène.

Exprimée en calories, la quantité de charbon extraite au Brésil représente d'ores et déjà plus de la moitié des besoins de l'industrie, des transports et des usages domestiques.

Le charbon indigène a une teneur élevée en cendres et en soufre. L'extraction du soufre contenu dans les pyrites résiduels des bassins de Santa Catarina devrait réduire notablement le prix de revient du charbon; en outre, le pays disposerait ainsi d'un métalloïde qui est l'élément de base de la production d'acide sulfurique, dont l'industrie brésilienne a le plus grand besoin.

Le traitement du charbon brésilien est une opération extrêmement difficile, mais des études ont montré que dans des conditions favorables, il est possible d'améliorer sa qualité. Des travaux sont déjà en cours à cette fin.

Alcool anhydre

La production d'alcool anhydre s'est beaucoup développée depuis 12 ans. Entre 1940 et 1950, elle s'est trouvée multipliée par huit, passant de 32 230 à 287 850 tonnes. Néanmoins, ces chiffres ne représentent que 0,5 pour cent de la consommation totale d'énergie du pays. Il convient de faire observer que notre production d'alcool anhydre ne pourra se développer au-delà d'un certain plafond, fixé par le volume de la production indigène de canne à sucre.

En plus de l'alcool anhydre et, bien entendu, du sucre, l'industrie de la canne à sucre fournit au Brésil de l'alcool hydraté.

Le mélange d'alcool anhydre et d'essence ainsi que d'autres substances donne un carburant mixte qu'utilisent actuellement de nombreux pays. Au Brésil, la composition de ce carburant est la suivante : alcool anhydre, 11,64 pour cent; alcool hydraté, 1,97 pour cent; essence, 86,39 pour cent.

En 1953, 11 486 distilleries d'alcool étaient en exploitation dans divers États de l'Union.

* 1 barrel = 158,98 litres.

Pétrole

L'exploitation du pétrole brésilien n'a marqué aucun progrès pendant une période de 40 ans. Encore qu'il eût été possible alors d'obtenir des capitaux privés à des conditions favorables, l'exiguïté du marché national, et qui plus est la possibilité de trouver plus sûrement du pétrole dans d'autres parties du monde, ont certainement retardé le développement de l'industrie pétrolière brésilienne. Cependant, depuis 1937, la participation des capitaux étrangers à toutes les phases de cette industrie a été pratiquement écartée par la loi. Seule fait exception l'industrie de la distribution. Quant à l'entreprise privée brésilienne, elle n'a joué qu'un rôle très réduit dans ce domaine. Les travaux de prospection, de forage et de raffinage ont été presque entièrement à la charge du Conseil national du pétrole, organisme officiel. Face à un accroissement de la demande de pétrole et de ses sous-produits, provoqué par le rythme toujours plus rapide du développement économique de notre pays, et face au danger de voir s'épuiser nos ressources en devises étrangères, le gouvernement a créé la Petroleo Brasileiro S. A. (Petrobrás), qui a pour mission d'intensifier l'exploitation de nos réserves. Le pétrole et le gaz naturel fournissent 33 pour cent de toute l'énergie consommée dans le monde entier sous forme de charbon, d'électricité, de pétrole et de gaz naturel. De 1940 à 1952, la production pétrolière du Brésil a été multipliée par dix, s'élevant pour finir à 103 000 tonnes. Même alors, elle ne représente que 0,27 pour cent de notre consommation totale d'énergie.

Les importations brésiliennes de pétrole sont passées de 782 000 tonnes en 1930 à 1 308 000 tonnes en 1939. Lorsque les restrictions du temps de guerre furent supprimées, elles continuèrent à augmenter, pour atteindre 1 650 000 tonnes en 1946. Elles quadruplèrent dans les six années suivantes, et atteignirent 6 196 000 tonnes en 1952. De nombreux facteurs ont contribué à cet accroissement extrêmement rapide de la consommation de pétrole : une situation démographique favorable, l'extension des concentrations urbaines, l'industrialisation, et la tendance à la mécanisation de l'agriculture. Mais le facteur le plus important a peut-être été le prix avantageux du pétrole sur le marché intérieur, la stabilisation de son prix international ayant coïncidé avec celle du cours de la monnaie brésilienne, jusque là surévaluée. On pourrait également retenir un certain nombre d'autres facteurs : les progrès techniques, aboutissant par exemple à l'adoption de la traction diesel dans les chemins de fer; l'installation de centrales thermiques comme stations de réserve, ou de complément à la production des centrales hydrauliques; enfin, le développement extraordinaire des transports routiers.

Les évaluations les plus récentes de notre demande de produits pétroliers, fondées sur la structure de notre économie, montrent que 35 pour cent d'entre eux vont aux transports, 36 pour cent à l'industrie, 6 pour cent à la consommation des ménages, et 5 pour cent aux autres utilisations. Il est naturellement impossible de chiffrer avec précision la part des divers combustibles dans la consommation des ménages. Certaines études récentes montrent que si l'on exprime ces parts en calories, le pétrole a représenté 17 pour cent de la consommation du pays, le bois, le charbon de bois, les déchets de canne à sucre et l'alcool éthylique ensemble, 74 pour cent, le charbon indigène, 4 pour cent, le charbon importé, 3 pour cent, et l'électricité, 2 pour cent. Les chiffres de la consommation d'énergie dans le monde montrent que le pétrole et le gaz naturel représentent 33 pour cent de cette consommation.

L'accroissement rapide de la consommation de produits pétroliers dans les années d'après guerre en tant que source d'énergie est très significative. En 1940, ces produits ne couvraient que 6 pour cent du total des besoins, alors que l'énergie hydro-électrique en couvrait 1,2 pour cent et les combustibles d'origine végétale 84 pour cent. On voit par là que le remplacement ultérieur des combustibles d'origine nationale par des produits pétroliers importés a joué un rôle important dans l'accroissement de la demande de combustibles liquides.

Au Brésil, la consommation de produits pétroliers par jour et par habitant n'atteint actuellement que le septième de celle de l'Australie, pays dont la situation économique offre un certain nombre d'analogies avec celle du Brésil, jusques et y compris la nécessité d'importer la quasi-totalité des produits pétroliers consommés dans le pays.

Nous avons dit plus haut que les travaux de prospection et de forage demeuraient presque entièrement entre les mains du Conseil national du pétrole du Brésil. Néanmoins, quelques raffineries entièrement financées par des capitaux privés sont déjà en exploitation. En outre, un nombre déjà important de pétroliers ont été achetés. Grâce à ces importantes initiatives, le Brésil va pouvoir juguler l'hémorragie de dollars qu'entraîneraient ses importations de produits pétroliers.

Il paraît évident que la production massive de pétrole ne peut réussir que si l'on accepte hardiment de courir les risques qu'une telle entreprise comporte. Les évaluations montrent que l'industrie nationale du pétrole, exploitée à un rythme suffisant pour faire face aux besoins du pays, devra absorber environ 1 milliard de dollars d'investissements, dont 70 à 80 pour cent devront être libellés en monnaie étrangère.

Si l'on veut que la production soit égale à la demande, d'importants investissements supplémentaires seront nécessaires pour permettre de nouvelles augmentations de la consommation actuelle. Il faut cependant tenir compte du fait que cette entreprise ne peut être parachevée en moins de dix ans, même si la prospection devait être couronnée du même succès que dans d'autres régions du globe.

Il ne sera pas exagéré de dire qu'étant donné ces considérations, il deviendra de plus en plus difficile d'élaborer les plans pour la production et le transport de l'énergie. Par exemple, il est hors de doute que certaines centrales importantes du pays ont besoin d'unités thermiques de réserve, si l'on veut éviter les réductions massives de production d'électricité résultant de périodes de sécheresse répétées. En outre, pour quiconque a constaté le développement économique extraordinaire qu'ont connu de nombreuses régions de l'arrière-pays après qu'elles eurent été pourvues de bonnes routes, répondant aux caractéristiques de régions de faible production et à population clairsemée, il serait impensable de préconiser l'interruption de ces travaux de construction de routes.

On estime que, en 1952, les importations totales du Brésil étaient composées pour 300 millions de dollars, soit pour 1/6, de produits pétroliers, camions, tracteurs, véhicules en pièces détachées, avions et pièces de rechange.

L'importation de produits pétroliers correspondait, en 1954, à 247 millions de dollars, ou 15,8 pour cent de la valeur des exportations. En ce qui concerne la quantité, les achats se répartissaient de la façon suivante :

Produits	*Tonnes*
Essence	2 625 499
Fuel-oils	4 262 021
Pétrole lampant	538 479
Huiles de graissage	208 456

Une augmentation totale de 1 164 901 tonnes a été enregistrée dans les importations par rapport à 1953.

L'augmentation a été de 196 057 tonnes pour l'essence; de 783 941 tonnes pour les fuel-oils (y compris le carburant pour moteurs diesel); de 130 389 tonnes pour le pétrole lampant, et de 54 516 tonnes pour les huiles de graissage.

Jusqu'en décembre 1953, 3 333 852 barrels de pétrole au total avaient été produits dans le pays, ainsi que 72 563 446 000 m³ de gaz naturel.

D'après les calculs, les réserves de gaz naturel s'élèvent à 1 200 millions de m³, à 9 000 calories par m³.

Notre flotte de pétroliers se compose de 22 navires au long cours totalisant 203 000 tonnes de charge, et de 10 navires caboteurs totalisant 19 200 tonnes. En outre, la production des sept raffineries en exploitation dans le pays s'élève à 122 000 barrels par jour.

Jusqu'ici, seuls les puits situés dans l'État de Bahia produisent régulièrement du pétrole, au rythme de 2 000 barrels par jour. Les réserves de cette région s'élèvent à 50 millions de barrels.

On a tout récemment obtenu du pétrole dans un puits foré à Nova Olinda, village situé sur la rive droite de la Madeira, rivière navigable, au cœur même de ce que les géologues appellent le Bassin central sédimentaire de la région amazonienne. C'est une formation paléozoïque, d'origine surtout marine, dont les sédiments sont formés de roches crétacées, tertiaires et quaternaires. Le pétrole ramené à la surface à Nova Olinda se présente sous la forme d'un liquide de couleur orange à fluorescence verte prononcée, et ressemble davantage à une huile partiellement distillée qu'à du pétrole brut.

D'après les premières analyses, on serait en présence d'un produit du type « paraffine base » analogue au type « midcontinent » que l'on trouve aux États-Unis d'Amérique, mais d'une teneur en paraffine supérieure.

Étant donné que la formation géologique du bassin de l'Amazone constitue une région de plus d'un million de km² s'étendant jusqu'en Bolivie et au Pérou, le succès rencontré par les forages de Nova Olinda semble justifier l'enthousiasme avec lequel l'opinion publique du Brésil y voit le point de départ d'une série de puits à gros débit qui seront successivement forés dans la région.

Potentiel hydraulique

Nous avons déjà dit que le potentiel hydraulique du Brésil a été évalué à 16 456 870 kW, et que jusqu'ici 17,1 pour cent seulement de ce potentiel avaient été exploités. A cet égard, le Brésil est le quatrième pays du monde.

L'électricité produite par la force hydraulique représentait 2 120 millions de kWh en 1940, et 7 millions de kWh en 1952, soit une augmentation de 140 pour cent. Exprimée en pourcentage, la part de l'électricité dans la consommation totale d'énergie a légèrement augmenté (de 1,28 pour cent en 1940 à 1,49 pour cent en 1950); ces chiffres signifient peu de chose, toutefois, si nous considérons que la part de l'électricité était en 1952 de 9,7 pour cent dans le bilan international de la consommation d'énergie.

Bien qu'une évaluation fondée sur les statistiques ait situé le potentiel hydraulique du pays aux environs de 16 millions de kW, en réalité, lorsque nous tenons compte des centrales à accumulation et à transposition de bassins hydrographiques, les calculs aboutissent à l'évaluation de 30 millions de kW comme potentiel des centrales hydrauliques. A ce chiffre, le Brésil détiendrait environ 8 pour cent des réserves hydrauliques du monde.

Le tableau 14 présente les ressources énergétiques du Brésil calculées d'après les chiffres officiels des réserves connues jusqu'ici.

Pour évaluer les prélèvements opérés par la consommation annuelle maximum sur les ressources disponibles, nous avons calculé pour chaque cas, sauf naturellement pour l'énergie hydraulique, la durée d'exploitation vraisemblable. De cette façon, et aux fins de la comparaison, la consommation maximum annuelle moyenne de 523 800 milliards de calories a été calculée en unités de chaleur.

Tableau 14

Potentiel d'énergie contenu dans les réserves connues

Sources	Réserves connues	Durée vraisemblable d'exploitation	Consommation maximum annuelle moyenne		Pour cent
			Unité	Milliards de calories	
Charbon, en millions de tonnes (5 000 000 cal/tonne)	1 000	100	11	55 000	10,5
Pétrole, en millions de mètres cubes (10 500 000 cal/tonne)	7	20	0,35	3 675	0,7
Gaz naturel, en millions de mètres cubes (8 900 cal/tonne)	1 200	20	60	545	0,5
Énergie hydraulique, en millions de kW	15	—	—	—	—
En milliards de kW (861 cal/kWh)	—	—	75	64 580	12,3
Réserves forestières : utilisation probable en millions d'hectares	160	64	25	400 000	76,0
TOTAL	—	—	—	523 800	100,0

Sources : Service national de la production minérale; Conseil national du pétrole; Service des eaux du Ministère de l'agriculture; Annuaire brésilien de l'économie financière, 1950.

Il convient de rappeler ici que les réserves utilisables de schistes bitumineux que possède le Brésil (43 pour cent du total mondial) prendront de plus en plus d'importance à mesure que les réserves des puits de pétrole s'épuiseront. On étudie déjà la possibilité de procéder à l'exploration systématique de ces schistes.

Le tableau 10 montre la consommation brésilienne d'énergie en 1952, la production indigène et les importations étant présentées séparément. En ce qui concerne la première, la consommation s'est élevée à 338 973 milliards de calories pendant l'année considérée. Il reste donc une certaine marge, d'après les chiffres du tableau 10, permettant au pays d'arriver au chiffre de consommation maximum avant que la durée vraisemblable d'exploitation ne soit épuisée. Il est cependant nécessaire de souligner que la consommation de bois et de charbon de bois s'approche déjà du niveau le plus élevé qui soit compatible avec une durée d'exploitation relativement brève (64 ans). En ce qui concerne l'énergie hydraulique, nous avons admis une puissance de 30 millions de kW, avec une production évaluée à 150 milliards de kWh (5 000 heures d'utilisation). Actuellement, la producduction d'énergie hydroélectrique n'atteint que 7 millions de kWh, soit environ 5 pour cent de ce chiffre limite.

Si nous ne tenons pas compte du rôle économique du bois dans cette comparaison, il est plus juste de classer le Brésil dans le groupe des pays à économie fondée sur l'hydroélectricité, étant donné que son potentiel hydraulique, on l'a vu, est sans aucun doute plus élevé que les évaluations officielles ne le feraient croire.

Quelle que soit l'importance des gisements houillers et pétrolifères dont de nombreux facteurs des plus probants indiquent la présence, le Brésil devrait attacher une signification particulière à ses réserves hydrauliques, qui sont supérieures à 15 millions de kW, même si l'on tient compte d'éléments défavorables tels que les années de sécheresse, l'absence de moyens d'accumulation et l'impossibilité d'opérer des transpositions de vallées.

Lorsque cette puissance (15 millions de kW) aura été entièrement utilisée, nous disposerons annuelle-

ment de 80 milliards de kWh pour un taux d'utilisation de 60 pour cent. Si dans l'intervalle la population devait s'accroître jusqu'à compter 100 millions d'habitants, chaque habitant disposerait de 800 kWh par an. En supposant que 30 millions de kW puissent être obtenus grâce à l'érection de barrages et à la transposition de vallées, nous aurons 160 milliards de kWh par an, pour le même taux d'utilisation de 60 pour cent, soit 1 600 kWh par habitant, toujours dans l'hypothèse où le Brésil compterait 100 millions d'habitants. Quand bien même un tel chiffre moyen serait encore inférieur à ceux qui valent aujourd'hui pour la Norvège, le Canada, la Suisse et d'autres pays, il représenterait un progrès notable pour le Brésil, dont la consommation annuelle moyenne n'est actuellement que de 320 kWh par habitant.

Énergie éolienne

Les problèmes techniques soulevés par l'utilisation du vent comme source d'énergie ont pu être résolus lorsqu'il s'est agi de petites installations, mais il reste beaucoup à faire pour les installations importantes, même en tenant compte des stations expérimentales existant en Allemagne, aux États-Unis d'Amérique, dans le Royaume-Uni, en U.R.S.S. et ailleurs.

L'énergie éolienne est pratiquement inépuisable, mais elle est dispersée dans l'espace et irrégulière dans le temps. L'homme ne peut cependant la négliger, devant l'accroissement rapide de ses besoins en électricité. En 1940, par exemple, alors que la population du Brésil atteignait 41,4 millions d'habitants, sa consommation annuelle d'énergie par habitant et par an atteignait 30,2 kth *. La moyenne pour le monde entier était alors de 6,6 kth par habitant et par an, les États-Unis arrivant en tête avec 51,6 kth par habitant et par an. Si on extrapole les chiffres fournis par la statistique, la population atteindrait 60,2 millions d'habitants en 1965; la consommation annuelle d'énergie par habitant serait alors de 13,1 kth, soit quatre fois plus qu'actuellement, et la consommation totale d'énergie serait de 6 à 7,5 fois plus forte qu'aujourd'hui. Dans les évaluations pour 1965, l'énergie thermique consommée sous forme de chaleur dans les ménages, qui représentait la plus grande partie de l'énergie utilisée en 1944, ne figure plus que pour le dixième du total. L'énergie hydraulique ne compte plus que pour 2 à 6 pour cent du total, et l'énergie éolienne n'entre même pas en ligne de compte.

Il n'en est pas moins vrai que l'énergie éolienne offre certains avantages qui ne sont nullement négligeables dans les conditions où se trouve actuellement placé le Brésil. Ainsi, par exemple, dans la région nord-est, qui renferme la neuvième partie de la superficie du pays, où vit le quart de sa population, et qui fournit le huitième de sa production agricole, les fermes isolées qui ne peuvent être alimentées par les centrales hydrauliques de Paulo Afonso pourraient utilement mettre l'énergie éolienne à leur service, surtout au moment des sécheresses périodiques. Nous sommes convaincus que l'installation de puissants moulins à vent, là où les conditions économiques et météorologiques sont favorables, et aussi de moulins plus petits qui assureraient l'alimentation à usage domestique (lumière, postes de radio, pompes à eau, etc.) améliorerait grandement les niveaux de prospérité économique et de vie culturelle au Brésil.

La figure 15 indique le régime des vents dominants. La possibilité de réaliser de telles installations est actuellement étudiée non pas seulement pour le nord-est du pays, mais aussi pour d'autres régions. Malheureusement, le régime des vents au Brésil n'est pas très favorable. Ce n'est que dans la région côtière et dans certaines vallées que la vitesse moyenne annuelle du vent atteint 3 ou 4 m/s, n'arrivant que rarement à 5 m/s.

Il y aurait lieu de normaliser les moulins à vent selon des conditions bien déterminées : 7,5 m/s constituerait un chiffre de base favorable pour la vitesse, au moment où l'on établirait la valeur potentielle théorique; le nombre des types devrait être réduit à 3 (1 kW—4 m/s; 4 kW—8 m/s; 15 kW—15 m/s). Ainsi, la production en grande série de ces moulins deviendrait possible au Brésil.

Énergie solaire

Le soleil déverse sur la terre une quantité d'énergie mille fois supérieure à celle dont l'homme a besoin. L'énergie solaire ne peut être utilisée que s'il est possible de la transformer en lui donnant des applications pratiques. On connaît les principes théoriques de cette transformation et aussi ses limites. La quantité d'énergie qu'il est possible de capter est fontion de la surface effective du miroir collecteur et de la possibilité de placer celui-ci dans une position qui lui permette de recevoir l'insolation la plus intense pendant le plus grand nombre d'heures au cours de son utilisation.

Certaines pertes inévitables limitent la quantité d'énergie solaire qu'il est possible de capter, autrement dit, le pourcentage du rayonnement que l'on peut transformer en énergie utilisable (voir fig. 17). Puisque le soleil représente une source d'énergie des plus économiques, on s'efforce actuellement de lui donner des utilisations pratiques. On a même procédé à des expériences sur l'utilisation directe de la lumière solaire. L'immense quantité d'énergie que le soleil envoie à la terre correspond, par unité de surface, à 1,33 kW par m^2, soit au total : $1{,}60 \times 10^{14}$ kW. Il y aurait donc un intérêt capital à pouvoir capter cette énergie fantastique par un procédé simple et à la transformer en courant électrique. Malheureusement, un groupe générateur thermique, dont l'emploi semble judicieux dans ces conditions, n'aurait qu'un très faible rende-

* 1 kth = 1 163 kWh.

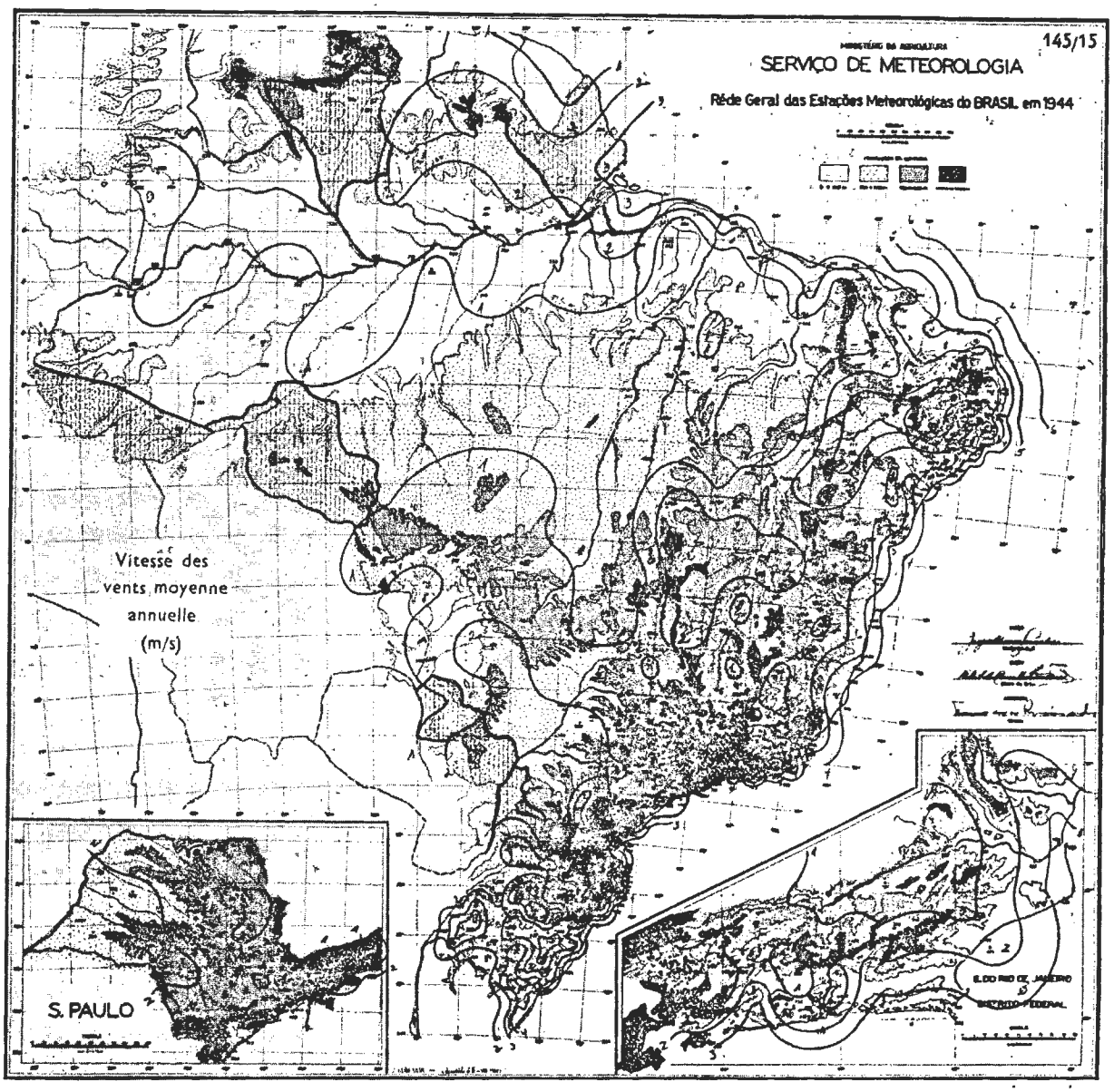


Figure 15.

ment, et seule une fraction très réduite de toute l'énergie reçue serait transformée en électricité.

Une partie de ce potentiel est absorbée par l'atmosphère. A basses altitudes et dans des régions où le ciel est exempt de nuages, elle atteint 10 000 W/cm². Le soleil, éloigné de la terre d'une distance moyenne de $1\,495 \times 10^{13}$ cm et dont le diamètre mesure $1{,}39 \times 10^{11}$ cm, projette sur le globe une quantité d'énergie équivalant au total à $37{,}13 \times 10^{26}$ W.

La densité de l'insolation reçue par la terre est fonction des quatre facteurs suivants : *a*) la latitude de l'endroit envisagé; *b*) la saison de l'année; *c*) l'heure de la journée; *d*) les conditions atmosphériques.

Les régions de plus forte insolation sont situées entre les tropiques, soit sur plus d'un quart de la surface du globe. Or, la plus grande partie du Brésil est située entre l'Équateur et le tropique du Capricorne (voir fig. 16 et 17). C'est précisément dans ces zones que nous devrions nous efforcer de tirer parti de l'énergie solaire. On sait que le captage de cette énergie est rendue difficile par le fait que tout corps possède des coefficients spécifiques d'absorption, de réflexion et de transmission qui varient avec la température de ces corps. Afin de capter l'énergie solaire, il faut donc non seulement recevoir le rayonnement, mais aussi en retenir la plus grande partie à la surface ou à l'intérieur des corps qui y sont exposés et empêcher, autant que

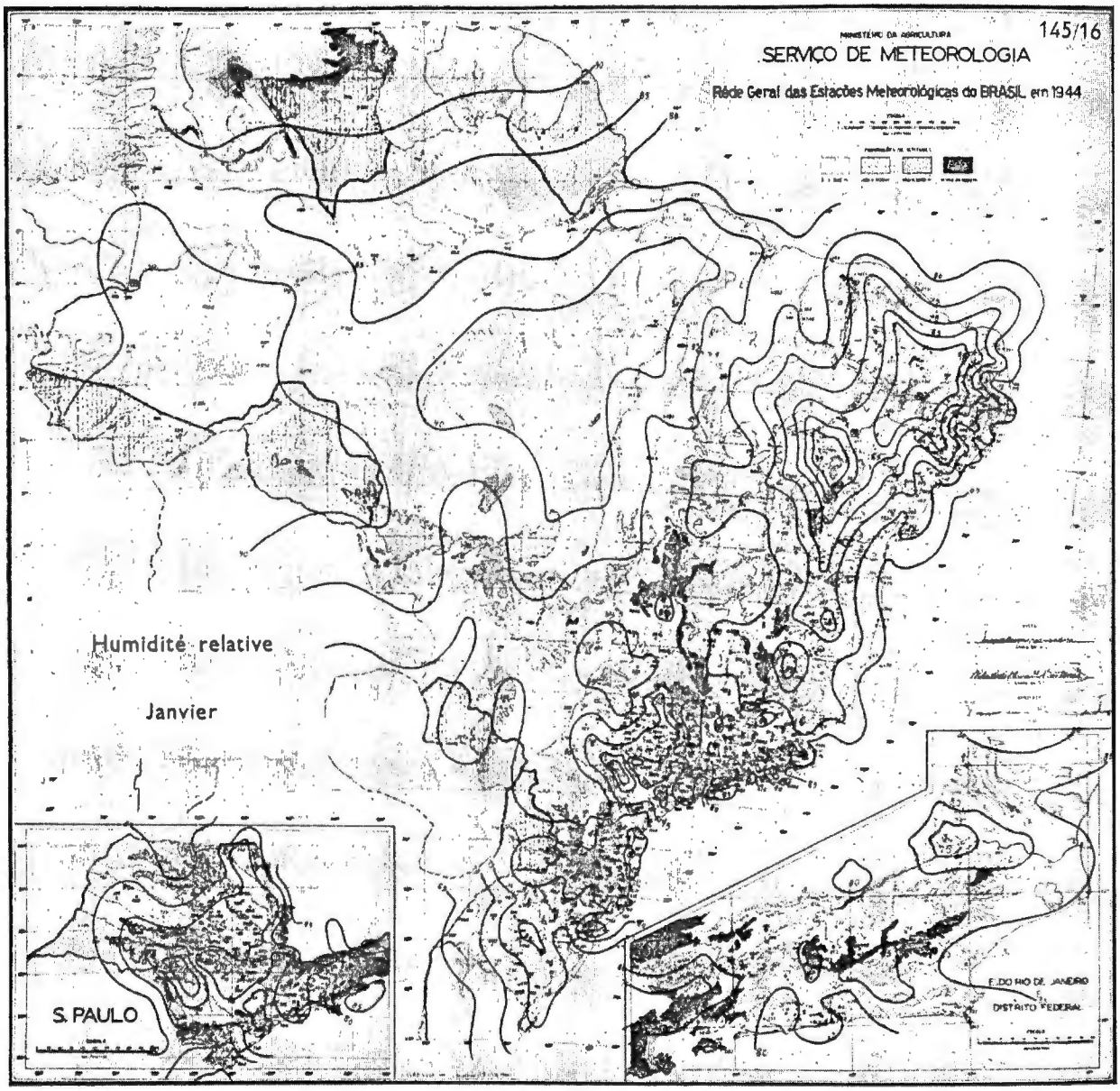


Figure 16.

possible, l'irradiation qui accompagne normalement l'élévation de température de ces corps sous l'action du soleil.

Les expériences tentées jusqu'ici montrent qu'il est possible d'augmenter la densité du rayonnement reçu en employant un système optique composé de lentilles et de miroirs. En théorie, ces deux appareils d'optique sont équivalents, mais lorsqu'il s'agit de concentrer de l'énergie solaire, les miroirs offrent plus d'avantages parce que leur emploi ne donne lieu à aucune perte par absorption, comme le cas se produit avec les lentilles. En outre, le poids et le prix de revient d'un miroir sont moins élevés que ceux des lentilles de même importance, surtout s'il s'agit d'appareils de grandes dimensions. Le pouvoir réfléchissant d'un miroir peut être tel que les pertes deviennent négligeables. On cherche actuellement à concentrer le rayonnement solaire pour en faire une source de force motrice, d'électricité et même de froid, sans parler de la chaleur à usage domestique. Le rendement thermodynamique d'une usine à énergie solaire est minime. Il existe cependant au Caire (Égypte) une installation de pompage d'eau de 50 à 60 HP dont le rendement est d'environ 6 pour cent.

Des études ont démontré qu'il n'est possible de recommander une installation de ce type que là où l'énergie hydraulique fait défaut, comme c'est le cas dans certaines régions du nord-est du Brésil, qui subissent périodiquement les effets de séche-

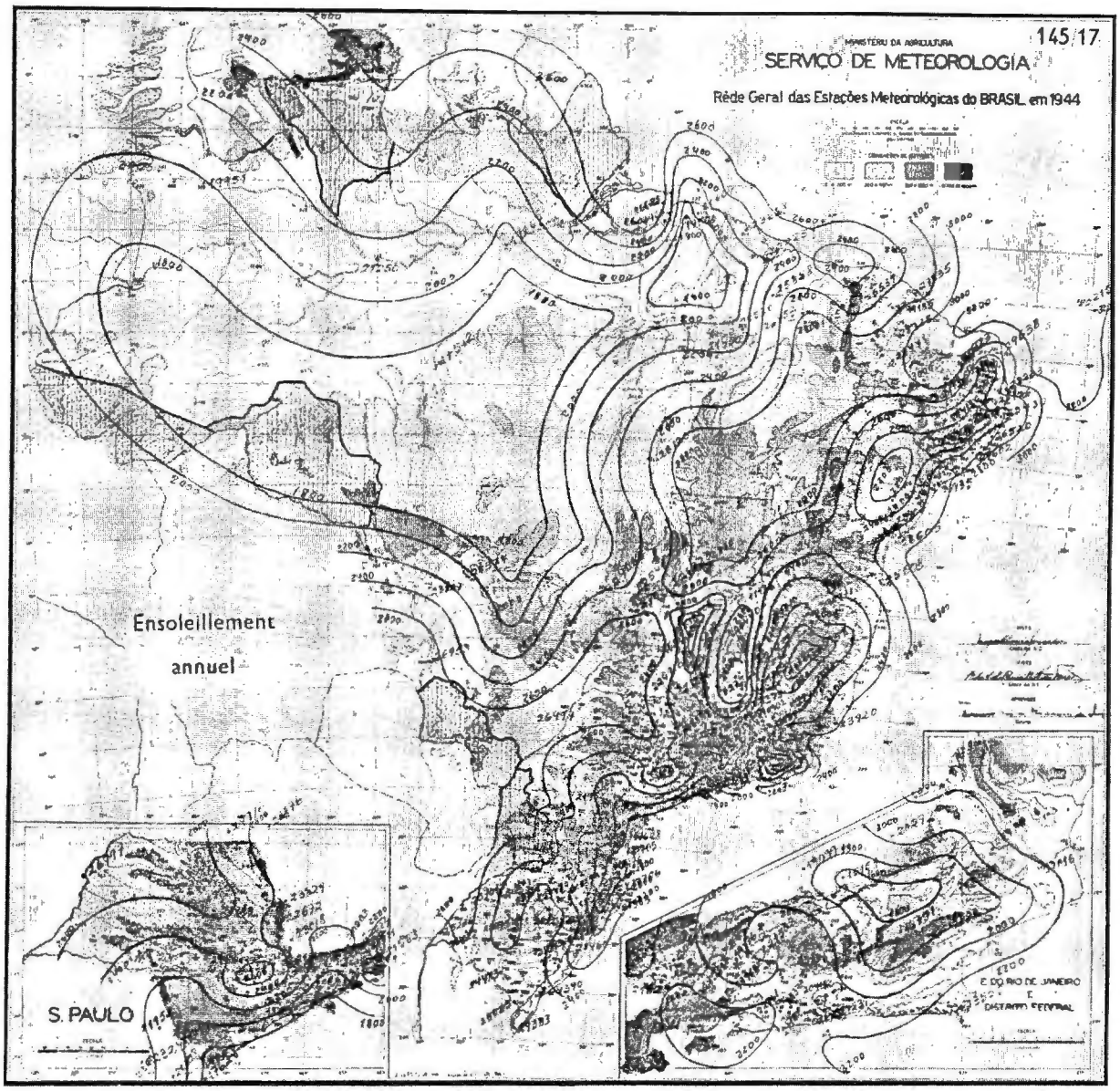


Figure 17.

resses dévastatrices. D'autre part, Félix Trombe déclare dans le *Journal des recherches* du Centre national de la recherche scientifique (nº 5, décembre 1953), que la transformation directe du rayonnement solaire en énergie électrique se fait actuellement avec un rendement trop faible pour que l'opération soit avantageuse. La transformation de la lumière solaire en lumière « emmagasinée » réduirait cependant, dans une mesure appréciable, les besoins en énergie du type que l'on consomme maintenant sous forme d'éclairage électrique.

On considère dès à présent comme réalisable, dans des conditions économiques, la production de froid à partir de l'énergie solaire, en raison du rendement thermodynamique élevé des machines frigorifiques. Ici, on utilise des miroirs paraboliques pour concentrer le rayonnement solaire sur une chaudière qui alimente en vapeur le cycle d'ammoniaque du générateur de froid.

Des expériences se poursuivent depuis 1949 sur des fours modernes chauffés à l'énergie thermosolaire. On a obtenu dans ces fours, par action directe du rayonnement solaire, des réactions en atmosphère conditionnée telles que la réduction d'oxyde de chrome métallique pur à une température de 2 000 °C ou le traitement de fer pur dans une atmosphère d'hydrogène ou sous vide.

D'autres expériences en cours portent également sur la cuisson des céramiques, pour lesquelles une température de 2 500 °C est nécessaire. Le miroir

collecteur se compose de 500 plaques de verre dont la face postérieure de 50 cm est recouverte, en premier lieu, d'une couche d'argent puis d'une couche de cuivre. Le réflecteur parabolique de 90 m² se compose de 3 500 plaques et donne un équilibre thermique d'environ 3 000 °C et une température industrielle de 2 700 °C. Selon Félix Trombe, nous pourrions facilement, avec un four de ce genre, obtenir la fusion de masses telles que 20 ou 30 kg, de quartz, par exemple, d'aluminium ou encore d'autres matières. Les résultats auxquels ont abouti jusqu'ici les expériences de ce genre nous permettent de croire que, dans un avenir relativement proche, il sera possible d'utiliser l'énergie solaire sur une assez large échelle et, par là, d'économiser des combustibles qui se raréfient de jour en jour. De ces expériences, on peut conclure que la distribution de l'énergie solaire peut être exprimée approximativement comme on l'indique au tableau 15.

Tableau 15

Énergie solaire par pied carré pendant une journée moyenne d'insolation particulièrement favorable

Désignation du lieu	Btu	Équivalent de combustible	
		En livres de charbon (avoir-dupois)	En kg de charbon
1. Moyenne annuelle (tropiques)	3 000	0,25	0,113
2. Latitude 35° à 45° — Zone tempérée (États-Unis)	2 000	0,17	0,077
3. Saison d'hiver (maximum)	2 000	0,17	0,077
4. Saison d'hiver (moyenne)	1 000 à 1 500	0,08 à 0,12	0,036 à 0,054

Source : Bulletin of Atomic Scientists, août 1951.
Remarques : Une heure de lumière solaire par temps clair frappant une surface d'un pied carré : 0,092 9 m², comme on l'a énoncé ci-dessus, peut être comparée à : *a*) vent : 27 milles (43 km) à l'heure sur une superficie d'un pied carré pendant une heure; *b*) eau : 300 gallons (1 135 l) tombant d'une hauteur de 100 pieds (30 m); *c*) gaz industriel : 1/2 pied cube (0,028 3 m³); *d*) charbon : 0,03 lb (0,014 kg).

En 1942, ont eu lieu des expériences portant sur le chauffage domestique par l'énergie solaire (Hottel H. C. et Woertz B. B., *The Performance of Flat-plate Solar-Heat Collectors*, Trans. A.S.M.E., LXIV, février 1942). D'autre part, les travaux de Telkes sur cette question sont bien connus. Ces expériences ont prouvé qu'il est possible de capter l'énergie solaire pendant l'hiver avec un rendement de 35 à 40 pour cent (Telkes M., *Solar House Heating — A Problem of Heat Storage*, Heating & Ventilation, XLIV, mai 1947).

Une autre application pratique à haut rendement de l'énergie solaire est la « distillation solaire ». Des îles tropicales arides pourraient s'assurer leur approvisionnement en eau par distillation d'eau de mer en utilisant le rayonnement solaire surabondant en ces milieux (Telkes M., *Solar Distillation*, Industrial and Engineering Chemistry). Dans ces régions tropicales, ce procédé aurait un rendement de 60 à 70 pour cent.

C'est dans le domaine de la photochimie qu'ont été déployés les plus grands efforts en vue d'utiliser l'énergie solaire, surtout en ce qui concerne la photosynthèse et l'amélioration des rendements agricoles.

Énergie des marées

Dans l'État de Maranhao, au nord du Brésil, on rencontre des conditions favorables à l'utilisation de l'énergie des marées. Outre leur amplitude qui atteint parfois 8 mètres, la configuration particulière d'une certaine baie dans laquelle se trouve une île offre un emplacement avantageux pour la construction d'une centrale. Le système de production continue par réservoirs alternés permet d'envisager l'utilisation de cette forme d'énergie à cet endroit. Les techniciens brésiliens étudient déjà la question avec une attention particulière.

Énergie thermique des mers

Le Brésil possède un très vaste développement côtier. Le plateau continental qui s'étend de l'extrême sud jusqu'à l'État de Bahia est très étendu mais, à partir de Bahia vers le nord, les conditions bathymétriques au voisinage immédiat de la côte sont favorables à l'installation des usines du type Claude-Boucherot, surtout dans la région des récifs côtiers de Pernambuco.

Cette question est également soumise à l'examen des autorités compétentes.

Conclusion

Le Brésil est l'un des pays dont les réserves hydrauliques sont les plus abondantes. Actuellement, il n'utilise cependant pas plus de 13,2 pour cent de son potentiel.

Le bois a été très largement utilisé comme source primaire d'énergie, ce qui a occasionné une surexploitation intense des forêts. On constate heureusement déjà une certaine baisse de cette consommation, qui demeure cependant élevée et correspond approximativement à 1 pour cent de nos réserves forestières.

Bien que notre pays possède de très abondants gisements de tourbe, il ne les a pas encore exploités à l'échelle industrielle.

Le Brésil possède également du lignite, mais à des distances considérables des centres industriels; aussi l'extraction de ce combustible est-elle réservée pour l'avenir.

Il existe dans le pays de vastes réserves de chistes bitumineux, surtout dans la vallée du Parahiba. Une distillerie pouvant produire 10 000 barrels par jour est déjà en construction.

Le charbon brésilien, encore que de qualité inférieure, a toujours constitué pour le pays une réserve sûre de combustible, notamment pendant les deux guerres mondiales, qui ont bouleversé son économie interne en interrompant les importations de charbon de bonne qualité nécessaire à l'industrie lourde. La quantité de charbon extraite au Brésil représente, exprimée en calories, plus de la moitié des besoins de son industrie, de ses transports et de sa consommation dans les ménages. Cette quantité est évaluée à environ 2 millions de tonnes par an.

Le Brésil produit en quantités importantes de l'alcool anhydre, autrement désigné sous le nom d'alcool pour moteurs, qui est ajouté à l'essence importée. En 1953, 11 486 distilleries d'alcool étaient en activité dans le pays.

En ce qui concerne les recherches pétrolières, la prospection et le forage se poursuivent activement. La consommation de produits pétroliers augmente d'année en année, occasionnant d'importantes sorties de devises et pesant lourdement sur notre balance commerciale avec l'étranger. Afin de faire face à cette situation, le gouvernement a décidé de fonder une société appelée Petrobras. Il est hors de doute que le Brésil possède d'importantes réserves de pétrole. Il résulte des vérifications faites que 43,4 pour cent de la superficie de son territoire sont composés de terrains sédimentaires favorables à la présence de pétrole. De récentes découvertes faites dans le bassin des Amazones ont fourni une nouvelle preuve indéniable de la très grande richesse du Brésil en pétrole. Il est essentiel d'exploiter rapidement cette richesse si l'on veut alléger le fardeau que représente l'importation de combustibles liquides dans le bilan économique de la nation.

LES POSSIBILITÉS DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE AU BRÉSIL

Il n'y a pas le moindre doute que l'énergie atomique doive être utilisée industriellement dans un avenir très prochain, que ce soit pour propulser des navires ou pour produire du courant électrique. Il est probable que son application à la traction des locomotives ou des automobiles est réservée à une époque plus éloignée, puisque la protection contre les rayonnements nocifs ne peut actuellement être réalisée qu'au prix d'un accroissement excessif du poids mort.

Au Brésil, les problèmes de l'énergie atomique sont du ressort du Conseil national de la recherche, qui relève directement du Président de la République. Le comité de l'énergie atomique, récemment créé, relève directement du Conseil national de la recherche.

Celui-ci a orienté ses activités vers les aspects suivants de la recherche nucléaire :

a) Prospection systématique, effectuée pour son propre compte, des minerais de thorium et d'uranium au moyen de méthodes modernes d'aérogéophysique;

b) Inventaire de la structure géologique, géochimique et pétrographique de ces minerais; évaluation de leur volume et de leur teneur en matières fissiles;

c) Étude du traitement chimique des minerais, en vue d'obtenir des sels d'uranium pour l'industrie;

d) Établissement avec des firmes étrangères spécialisées de contrats pour l'étude et la construction d'usines de traitement chimique des minerais uranifères;

e) Établissement, avec des firmes étrangères spécialisées, de contrats portant sur le projet et l'installation d'une usine d'affinage des sels d'uranium et de production d'uranium-métal, techniquement pur, destiné à être utilisé dans des piles atomiques;

f) Exécution d'un programme de relevés topographiques des gisements de minerais d'uranium repérés dans le pays;

g) Établissement avec des sociétés étrangères de contrats portant sur la fourniture de matériel d'ultracentrifugation à utiliser en vue de former un personnel compétent et de procéder à des expériences préliminaires dont l'objet serait d'obtenir un uranium légèrement enrichi utilisable dans des piles atomiques;

h) Envoi de techniciens, d'ingénieurs et de physiciens en stage d'étude à l'étranger, afin de disposer d'ingénieurs atomistes et de spécialistes de la chimie et de la mécanique nucléaires, de la technologie des piles et de la chimie des radioisotopes, de la chimie de l'uranium et du thorium et des techniques d'ultracentrifugation, etc.;

i) Participation à des réunions et à des congrès internationaux ayant trait aux piles et à l'industrie nucléaire; échanges mutuels avec divers pays pour tout ce qui concerne la science atomique;

j) Séjour au Brésil d'un certain nombre de géologues, de chimistes, de professeurs et de spécialistes étrangers en vue d'étudier des problèmes particuliers se rapportant aux minerais radioactifs (des rapports très utiles ont déjà été reçus au Brésil);

k) Mise à exécution de toute initiative intéressant l'exploitation industrielle de minerais extraits au Brésil et présentant un intérêt pour l'industrie atomique, et notamment, acquisition de sels d'uranium qui ne peuvent légalement être exportés que par un gouvernement à destination d'un autre, en vue de constituer un stock de réserve qui permettra au Brésil d'exécuter son programme de travaux atomiques;

l) Impulsion donnée à la découverte de gisements uranifères par l'achat des minerais extraits.

Ces achats seraient également un moyen de promouvoir la confiance en la politique atomique du gouvernement chez les propriétaires de gisements, des concessions étant accordées pour l'extraction de l'uranium ou du thorium qui pourraient se trouver dans ces gisements;

m) Organisation d'une étude d'ensemble portant sur le traitement des sables de monazite et sur les opérations chimiques exécutées dans les usines existantes en vue de séparer les sels d'uranium et de thorium contenus dans ces sables.

Selon les spécialistes de la physique nucléaire, les matières suivantes sont considérées comme essentielles à l'industrie atomique : *a*) les minerais dont on peut extraire de l'uranium et du thorium métalliques; *b*) l'uranium et le thorium, à toute phase de leur traitement préalable à l'enrichissement de l'uranium par l'adjonction de proportions plus élevées d'uranium-233 ou d'uranium-235.

On considère aujourd'hui le thorium comme l'un des éléments les plus importants de la production d'énergie atomique. La monazite est la source la plus importante de thorium, et actuellement ses gisements les plus abondants se trouvent en Inde et au Brésil. Le Gouvernement indien a récemment installé une usine de traitement de la monazite en vue de produire de l'uranium et du thorium. On évalue à plus de 2 millions de tonnes le volume des sables de monazite de la province de Travancore. Les réserves du Brésil sont un peu moins importantes, et leur teneur moyenne en oxyde de thorium est de l'ordre de 6,75 pour cent. Nous sommes également en train de créer notre propre industrie de la monazite. Une usine pouvant traiter trois mille tonnes par an fonctionne depuis 1951.

C'est un fait bien connu que le thorium placé à l'intérieur d'une pile atomique donne naissance à de l'uranium-233, qui est un combustible atomique. La question de l'utilisation du thorium dans un convertisseur est subordonnée au rapport qui existe entre le nombre d'atomes d'uranium-233 formés et le nombre d'atomes d'uranium-235 détruits par la fission. Si ce rapport est supérieur à 1, on peut conclure que le thorium deviendra, dans un proche avenir, un des combustibles nucléaires les plus remarquables, ceci d'autant plus qu'il s'obtient plus facilement que l'uranium.

Chaque atome d'uranium-235 détruit par la fission produit en moyenne 2,3 neutrons, dont un est nécessaire pour assurer la réaction en chaîne. Il reste alors 1,3 neutron, et l'on peut considérer que 0,14 est perdu par absorption dans le modérateur et 0,14 est libéré ou est absorbé par les barres de commande. Il reste donc 1,02 neutron par fission qui peut être transformé d'uranium-238 en plutonium, ou de thorium-233 en uranium-233 (Stephens : *Nuclear fission and atomic energy*). La pile au thorium fournira donc le moyen d'accroître sensiblement les réserves de combustible nucléaire, puisque l'on rencontre le thorium dans l'écorce terrestre à proportion de 4 unités par million (Rapport de Smyth : *Availability of Materials*).

Les principaux gisements de monazite du Brésil se trouvent sur une bande côtière située entre l'extrémité méridionale de l'État de Bahia et la partie septentrionale de l'État d'Espirito Santo.

Nous traiterons plus loin de nos réserves d'uranium. L'uranium est sans aucun doute un élément d'importance exceptionnelle dans l'exécution de tout programme intéressant les piles atomiques. La teneur en uranium des grands gisements uranifères déjà découverts dans le monde varie en général de 0,1 pour cent à 0,3 pour cent d'U_3O_8, soit des pourcentages réellement faibles. Au Brésil, la teneur moyenne des gisements est de 0,5 pour cent. Il est toutefois possible maintenant, du moins en théorie, grâce au procédé connu sous le nom de « régénération », de mettre l'uranium-235 en présence de l'uranium-238 et ainsi de produire du plutonium. J. R. Menke, dans son ouvrage intitulé *Nuclear fission as a source of Power*, déclare que par ce procédé, chaque livre (avoirdupois) d'uranium-235 brûlé en combinaison avec une livre d'uranium-238 produit : *a*) 10 000 000 de kWh d'énergie sous forme de chaleur; *b*) 1 livre (avoirdupois) de plutonium; *c*) 1 livre (avoirdupois) d'isotopes radioactifs.

Ceci représente une énergie trois millions de fois plus élevée que celle qui serait obtenue par la consommation d'un poids égal de charbon.

Cependant, J. R. Menke n'a pas tout dit, puisque le procédé de « régénération » permet d'utiliser la plus grande partie de la quantité existante d'uranium-238, comme le montrent les renseignements cités dans le rapport nº 3 de la Commission de l'énergie atomique des Nations Unies.

Le pourcentage d'uranium-235 serait approximativement égal à la 140e partie de la teneur en uranium-238; il semblerait donc que pour chaque livre (avoirdupois) d'uranium-235, 140 livres (avoirdupois) d'uranium-238 pourraient être transformées en plutonium au moyen de plusieurs opérations successives. En utilisant l'un des neutrons produits par la fission de l'uranium-235 pour transformer l'uranium-238 en plutonium, on obtient approximativement une livre (avoirdupois) de plutonium par livre (avoirdupois) d'uranium-235 détruit. Dans les réacteurs régénérateurs, la perte de neutrons ainsi que leur absorption par des impuretés est réduite au minimum. C'est pourquoi il est possible d'employer 1,02 à 1,05 neutron en cours de fission pour produire de l'uranium-233 ou du plutonium-239. Dans ces conditions, la quantité de plutonium obtenue à la suite de chaque opération est toujours plus élevée que celle de l'uranium-238 utilisé. Le procédé du réacteur régénérateur est conçu non seulement pour l'uranium-238, mais aussi pour le thorium.

M. Robert Le Baron, président du Comité militaire de liaison de la Commission de l'énergie atomique des États-Unis, déclare : « La différence économique fondamentale entre la pile régénératrice et les procédés actuels dits convertisseurs

est que le premier fonctionnerait dans des conditions beaucoup moins coûteuses, dans la mesure où la dépense en combustible peut être estimée à environ 1,5 millième de dollar par kWh, soit l'équivalent d'un charbon qui coûterait 7,5 dollars la tonne. Or, cette évaluation vaut pour le procédé du convertisseur. S'il était possible de faire fonctionner le régénérateur et de convertir intégralement la substance dans les conditions que nous venons d'examiner, la dépense en combustible se trouverait réduite au centième environ de notre évaluation de 1,5 millième par kWh » (U. S. News and World Report, 25 juin 1954).

Cette déclaration donne une idée assez exacte de la réalité.

Aspects généraux de la question de l'énergie atomique

La possibilité d'utiliser l'uranium et le thorium pour produire de l'énergie atomique à des fins pacifiques ou militaires ou pour des utilisations industrielles donne désormais à ces éléments une valeur stratégique et économique exceptionnelle.

Étant donné qu'il existe des traitements chimiques et métallurgiques permettant d'extraire l'uranium et le thorium de leurs minerais d'origine, et également des traitements physio-chimiques spéciaux ayant pour objet de séparer et de concentrer les isotopes qui se prêtent à la combustion nucléaire, les pays pour lesquels l'énergie atomique présente un intérêt particulier devraient donc en étudier les possibilités avec la plus grande attention. Même si d'autres pays possédant des sources d'énergie naturelle abondantes et variées s'intéressaient plus spécialement aux promesses de suprématie militaire que l'on peut discerner dans ces découvertes, le Brésil, pays insuffisamment pourvu de ressources en combustibles usuels, et dont le potentiel hydraulique est situé en des endroits très éloignés des grands centres de population et d'activité industrielle, s'y intéresse surtout en raison de la nécessité urgente où il se trouve d'offrir à son peuple de nouvelles sources d'énergie pour lui permettre de suivre le rythme de son développement toujours plus rapide.

L'immense importance de ces deux aspects de la question a, en fait, exercé une influence considérable sur le choix qu'ont fait les divers pays entre les politiques atomiques qui s'offraient à eux. Elle a été un élément beaucoup plus décisif que la superficie des gisements d'uranium et de thorium déjà découverts sur leurs propres territoires.

Il n'en est pas moins évident que lorsqu'il s'agit d'envisager l'utilisation de l'énergie atomique à des fins industrielles, la question des approvisionnements en matières de base est fondamentale : il serait impossible à un pays de mettre l'énergie nucléaire à la disposition de son industrie s'il ne pouvait absolument compter sur ses propres gisements exploitables d'uranium et de thorium. Telle est précisément la raison pour laquelle la Commission brésilienne de l'énergie atomique s'est intéressée depuis sa fondation à l'approvisionnement en minerais radioactifs. De ce point de vue, la situation du Brésil est assurément très favorable. Nous sommes probablement le seul pays à posséder des gisements assez importants d'uranium et aussi de thorium.

Importance économique de l'énergie atomique pour le Brésil

Lorsque l'on essaie d'apprécier les avantages qui découlent de l'utilisation de l'énergie nucléaire à des fins industrielles, il est impossible de ne pas tenir compte des différences fondamentales d'ordre économique que le problème présente pour chaque pays.

Son importance économique sera relativement faible dans les pays hautement industrialisés disposant de ressources abondantes en charbon, en pétrole et en énergie hydraulique. Pour les pays de ce genre, l'énergie atomique n'offre qu'un intérêt assez éloigné, qui sera fonction soit du danger d'épuisement de ces ressources, soit des besoins de telle ou telle région ne pouvant que difficilement s'approvisionner en énergie, soit encore de l'attrait que présentent les nouvelles perspectives d'investissement pour les capitaux importants en quête d'emploi.

Il n'en sera pas de même dans les pays imparfaitement développés, ni à plus forte raison dans ceux où s'opère la transition entre une économie agricole et une économie industrielle, le Brésil, par exemple. Ici, l'importance économique de l'énergie atomique sera beaucoup plus grande en raison de la pénurie d'énergie dont ces pays souffrent habituellement, et, par conséquent du prix de revient élevé du kWh produit par les méthodes conventionnelles.

A ces circonstances s'ajoute, dans le cas du Brésil, l'insuffisance des sources primaires d'énergie et des moyens de transport, qui donne une importance exceptionnelle à la question.

En réalité, les réserves connues de charbon et de pétrole, ajoutées à celles qui sont déjà exploitées dans le pays, ne sont pas seulement insuffisantes. Elles sont aussi, dans la plupart des cas, situées trop loin des grands centres urbains et industriels, où la pénurie d'électricité se fait déjà durement sentir, et où il est nécessaire, en conséquence, de rationner la consommation pendant les saisons sèches. En dépit des importants travaux d'hydraulique et d'hydroélectricité déjà réalisés, par exemple à Cubatao, Sao Paulo et Pombas, et à Força Cava, dans l'État de Rio de Janeiro, les résultats n'ont pas suffi jusqu'ici à satisfaire la demande croissante d'électricité qui a suivi la rapide expansion de l'industrie dans ces deux centres. Pour donner une idée du rythme auquel s'accroît la demande d'électricité de l'industrie, rappelons qu'entre 1940 et 1954 la consommation d'électricité a doublé au Brésil.

Nous ne devons pas oublier que notre production d'énergie est tributaire pour une part considérable du charbon et du pétrole que nous importons de l'étranger et qui pèsent très lourdement sur notre balance commerciale. C'est un fait universellement reconnu qu'actuellement l'énergie électrique ne peut être transportée dans des conditions économiques au-delà d'un rayon d'environ 600 km. Aussi l'un des grands avantages qu'offre l'énergie produite dans des centrales nucléaires est que ce genre de centrale peut être installé partout où la demande se fait sentir, sans qu'interviennent à aucun moment les obstacles d'ordre géographique ou hydrographique que rencontre à l'ordinaire le transport des combustibles.

Telles sont les raisons qui ont amené le Brésil à exécuter sans attendre un projet de pile expérimentale à refroidissement par l'eau et utilisant du combustible indigène. Ce dernier point joue un rôle essentiel dans le programme que la Commission brésilienne de l'énergie atomique, agissant sous les auspices du Conseil national de la recherche, entend réaliser à des fins technologiques et industrielles, c'est-à-dire à des fins entièrement pacifiques.

Nous possédons déjà une installation industrielle excellente pour le traitement chimique de la monazite, et nous espérons pouvoir d'ici peu installer une usine où l'uranium extrait du plateau de Paços de Caldas subira un traitement métallurgique qui lui assurera la pureté nucléaire requise.

Pour donner une idée de l'importance des réserves de minerais radioactifs du Brésil, il suffirait de dire que les gisements d'uranium et de thorium déjà prospectés peuvent fournir, à eux seuls, une énergie nucléaire cent fois plus importante que l'énergie thermique qui pourrait être tirée de tout le charbon contenu dans les réserves du Paraná, de Santa Catarina et de Rio Grande do Sul.

Les gisements d'uranium et de thorium

Il y a peu de temps encore, on ignorait l'existence au Brésil de gisements d'uranium présentant un intérêt économique. On entendait parfois mentionner la présence, en des endroits éloignés l'un de l'autre, de minéraux du groupe niobium-tantale tels que la fergusonite, la samarskite, la polycrase dans les pegmatites extraites pour le mica, le béryllium ou les pierres fines qu'ils contenaient. Bien que la teneur en uranium de ces minéraux soit relativement élevée, atteignant parfois 15 à 18 pour cent, leur distribution est très irrégulière et leur contenu ne s'obtient que par des procédés primitifs d'extraction manuelle qui sont toujours onéreux et ne peuvent que difficilement acquérir une importance industrielle. Il convient cependant de remarquer que, récemment, la présence de ces minéraux a été si fréquemment signalée dans les États de Minas Gerais, Espirito Santo, Bahia, et dans le nord-est du Brésil, que l'on pourrait songer à les utiliser comme source accessoire d'uranium. Quelques échantillons isolés de pechblende ou d'uranite, minéral à haute teneur en uranium, ont également été rencontrés dans des gisements de pegmatite dans l'État de Minas Gerais (Brejaubas) ainsi que dans les États de Parahiba et de Rio Grande do Norte, surtout dans la région de Picui, à la limite de ces deux derniers États. Quelque puisse être leur intérêt du point de vue géologique et minéralogique, ces minéraux n'ont encore acquis aucune importance industrielle jusqu'ici. On a découvert récemment de la djalmaïte, minéral uranifère de composition variable, qui se rencontre plus ou moins régulièrement dans des dykes de pegmatite de surface étendue, dans la région de Sao Joao del Rei, sur les rives du Rio das Mortes.

La djalmaïte, un tantalate d'uranium, se rencontre associée à la cassitérite, minerai d'étain déjà exploité depuis longtemps dans cette région. Le gisement le plus important est celui de Volta Grande, où l'on note la présence d'étain, de tantale et d'uranium dans des dykes de pegmatite décomposée dont l'exploitation peut être assez facilement entreprise par des procédés d'extraction hydraulique. L'association intéressante du tantale et de l'étain, la forte teneur en lithium (sous forme de spodumène) de la pegmatite, offrent des perspectives intéressantes à l'utilisation d'uranium comme sous-produit.

L'une des formes les plus intéressantes sous lesquelles se rencontre actuellement l'uranium au Brésil est constituée par des gisements de zirconium et d'uranium sur le Plateau de Poços de Caldas. Ces gisements se répartissent dans une région circonscrite par un rectangle mesurant environ 460 km², et ont la forme de gisements alluviaux, éluviaux et en veines, la teneur moyenne en uranium du minéral (il s'agit ici de caldasite) approchant de 0,5 pour cent U_3O_8. On rencontre difficilement des échantillons de zirconium qui contiennent moins de 0,2 pour cent d'uranium; sa teneur s'est élevée dans certains cas à 2,5 pour cent d'U_3O_8. Du point de vue géologique, les roches de la région sont alcalines, du type de la foyaïte, et dans certains cas, l'uranium se trouve imprégné dans les roches environnantes.

Les évaluations du volume total des gisements sont encore incertaines, car on n'a pas fait de forage précis. On estime, toutefois, que les réserves de minerai de zirconium et d'uranium ne sont pas inférieures à 500 000 tonnes.

On a utilisé au Brésil, avec d'excellents résultats, les nouvelles méthodes de prospection aéro-géophysique effectuée à l'aide de détecteurs à scintillomètre embarqués à bord d'avions, qui permettront de déceler la présence de minerais radioactifs dans le sol. Ces relevés aériens ont permis de constater d'importantes anomalies scintillométriques, notamment dans la région d'Araxá et dans les régions adjacentes de Sao Joao del Rei. Des observations sur place sont en cours; elles doivent permettre de découvrir si la radioactivité constatée est due à la présence de minerais uranifères ou thorifères.

C'est dans l'État de Bahia que des gisements uranifères ont été le plus récemment découverts au Brésil. L'uranium s'y trouvait associé (sous forme de petits grains de pechblende ou de cristaux d'uraninite) à des conglomérats aurifères dans la région de Jacobina.

Bien que la teneur en uranium de ces conglomérats soit relativement faible (de l'ordre de quelques centièmes pour cent), la présence d'uranium dans un minerai aurifère à teneur assez élevée offre des perspectives favorables à l'exploitation industrielle. Cette association se rencontrerait dans une région étendue, de formation géologique semblable à celle qui existe en Afrique du Sud, où des conglomérats du même genre font l'objet d'une exploitation intensive en vue de la production d'uranium.

Thorium

On connaît depuis longtemps l'existence de sables de monazite sur la côte du Brésil; ils sont échelonnés, à des concentrations variables, le long des côtes des États de Rio de Janeiro, Espirito Santo et Bahia. Les gisements de la région d'Itabapoana, dans l'État de Rio et de Guarapari, dans l'État d'Espirito Santo, sont particulièrement riches, et fournissent la plus grande partie de la monazite actuellement produite au Brésil. La monazite du Brésil est un phosphate de terre rare, où prédominent des éléments du groupe cérium, et qui contient environ 7 pour cent d'oxyde de thorium et 0,1 pour cent d'oxyde d'uranium. En raison de la nature alluviale des dépôts de monazite, il est difficile d'évaluer avec précision leur volume total, mais étant donné qu'il existe maintenant des moyens de concentrer les sables dits « pauvres » au point de leur donner une valeur économique, on peut supposer que les gisements connus de la région côtière contiennent à eux seuls plus de 100 000 tonnes de monazite. Si nous retenons la possibilité d'exploiter ultérieurement dans des conditions économiques les gisements pléistocènes des formations dites « à glissement de terrain », les réserves évaluées de monazite seraient très sensiblement plus abondantes.

De récents travaux de prospection ont révélé non seulement de nouveaux gisements côtiers, mais aussi d'importantes concentrations de monazite dans les gisements éluviaux et alluviaux situés à l'intérieur de l'État de Minas Gerais, ainsi qu'à S. Raphaël et à Florania, dans l'État de Rio Grande do Norte.

En outre, d'autres minéraux, contenant du thorium, mais différents de la monazite, ont également été identifiés sur le territoire brésilien, par exemple la thorianite dans l'État de Ceara, l'uranothorite dans l'État de Bahia, et la bastnaésite, un carbonate de terre rare contenant du thorium, dans le gisement de Morro de Ferro, sur le Plateau de Poços de Caldas. La région d'Araxá, dans l'État de Minas Gerais, offre également des conditions favorables à l'extraction de thorium. Il y a lieu de faire observer que le thorium d'Araxá se trouve associé à des minerais de niobium, ce qui augmente ses chances d'être utilisé dans l'industrie. Il faut également considérer que le Brésil possède l'une des plus vastes étendues de roches archéennes qui soient au monde, et que les minerais uranifères et thorifères se rencontrent généralement dans ces roches. Jusqu'ici, une très faible proportion seulement de cette région a été systématiquement prospectée au Brésil. Les chances sont donc assez grandes de voir encore augmenter l'importance des réserves du Brésil en minerais radioactifs.

Traitement industriel des minerais

A côté d'usines de concentration produisant de la monazite tirée des dépôts alluviaux de la zone côtière, le Brésil possède des établissements industriels fort bien équipés où s'effectuent le traitement chimique de ce minéral, selon les méthodes les plus modernes et les plus économiques d'extraction du thorium, sa séparation des terres rares qu'il contient, et la récupération, à titre de sous-produit, des petites quantités d'uranium qui se trouvent associées à la monazite.

Ces usines peuvent également être adaptées, sans difficulté, à l'extraction d'uranium à partir des tantalites à niobium uranifères que l'on recueille très fréquemment comme sous-produit dans les opérations d'extraction du mica, du béryllium et des pierres précieuses ou fines. Le Conseil national de la recherche du Brésil envisage sérieusement de procéder au traitement industriel des minerais de zirconium uranifère du plateau de Poços de Caldas.

L'étude chimique et semi-industrielle de ces minerais a fourni des directives précises, qui ont permis de perfectionner le traitement chimique des minerais, et grâce auxquelles on dispose désormais des éléments nécessaires à la mise en projet de deux premières usines : dans l'une de celles-ci, l'uranium sera extrait des minerais et un sel d'uranium produit à un degré technique de pureté; dans l'autre, un uranium de grande pureté sera produit par des procédés métallurgiques et pourra être utilisé dans des piles nucléaires.

On a également entrepris le traitement industriel du béryllium, dans une usine qui produit de l'oxyde de béryllium.

Importance économique des réserves d'uranium et de thorium connues

La prospection intensive entreprise au Brésil depuis quatre ans, à l'aide surtout de méthodes aéro-scintillométriques et magnétométriques, a révélé de nouveaux et importants gisements d'uranium et de thorium. Ce travail se poursuit, et la recherche géologique a ouvert récemment de nouveaux horizons en démontrant la présence d'uranium dans les conglomérats aurifères de Serra Jacobina, État de Bahia.

De nouveaux gisements de minerais thorifères ont aussi été découverts dans le nord-est du pays et dans l'État de Minas Gerais. D'après l'évaluation quantitative déjà faite en ce qui concerne les gisements connus de minerais uranifères et thorifères, il est possible de calculer approximativement la quantité totale d'énergie que ces réserves représentent.

Du point de vue de la production d'énergie, ces gisements, nous l'avons déjà dit, représentent environ cent fois plus d'énergie que l'ensemble du bassin houillier du Brésil méridional. On se souviendra, d'autre part, que faute de moyens de transport le charbon de ce bassin ne peut pas être utilisé en d'autres parties du pays. Au contraire, l'uranium et le thorium donnent la possibilité de distribuer de l'énergie dans les régions les plus éloignées du Brésil. En outre, le Brésil constitue l'une des grandes formations archéennes du monde, où le travail de prospection systématique de l'uranium et du thorium ne fait que commencer.

Conclusions

Étant donné qu'il lui faut faire face à des pénuries périodiques d'électricité, et que ses autres sources indigènes d'énergie sont insuffisantes, le Brésil compte parmi les pays qui s'intéressent le plus vivement aux utilisations pacifiques de l'énergie atomique.

La formation de physiciens et de techniciens spécialisés a été la première des mesures prises par le Brésil pour résoudre ce genre de problèmes, et d'autres décisions sont envisagées dans cet ordre d'idées.

La prospection des riches gisements d'uranium et de thorium existant dans le pays se poursuit activement, et, dans le même temps, les avants-projets d'une usine où s'effectueraient le traitement des minerais radioactifs, ainsi que les opérations métallurgiques complémentaires, sont en cours d'étude.

Le Brésil possède déjà des installations qui lui permettent de traiter ses réserves de sables de monazite.

Une étude générale de l'approvisionnement du Brésil en énergie montre que cet approvisionnement est insuffisant. D'autre part, le pays passe actuellement d'une économie strictement agricole à une économie à base industrielle. La pénurie d'électricité se fait sentir davantage encore pendant l'inévitable période de transition.

Cet ensemble de constatations amène à conclure qu'il est de nécessité immédiate pour le Brésil de construire une pile expérimentale refroidie à l'eau naturelle et utilisant de l'uranium enrichi. Ce serait là une mesure préliminaire à la suite de laquelle il serait possible d'envisager la construction d'une pile expérimentale de 70 000 kW, à usage industriel.

LES CENTRALES ATOMIQUES DANS L'ÉCONOMIE DU BRÉSIL

Lorsque l'on s'interroge sur l'importance de l'électricité de source nucléaire dans l'économie du Brésil, on ne doit pas oublier que le prix de vente du kWh ne constitue que l'un des aspects de la question, et non l'aspect essentiel. Ce qu'il s'agit d'assurer avant tout, c'est la distribution de l'électricité partout où celle-ci est requise. Il y a là une nécessité absolue pour le Brésil, pays où le réseau des transports est insuffisant en quantité comme en qualité. Nombreuses sont les régions, à l'important potentiel de richesses, dont la mise en valeur est ralentie par le manque d'électricité.

Dans les régions les plus industrialisées du pays, en particulier au voisinage des grands centres de Rio et de Sao Paulo, on constate déjà une nette pénurie d'énergie pendant la saison sèche. Une centrale thermique de 200 000 kWh (Piratininga) consommant des huiles de pétrole importées, a été récemment installée à proximité de Sao Paulo dans le cadre du programme visant à compléter la production actuelle d'électricité.

Les chiffres et les données diverses présentées dans les chapitres précédents montrent que, dans les régions de l'intérieur du pays, la puissance moyenne installée des centrales hydrauliques et thermiques est d'environ 10 000 kW. La solution idéale consisterait pour ces régions à disposer de petites centrales nucléaires dont la capacité atteindrait cet ordre de grandeur, à supposer que de telles centrales puissent être construites. Les techniciens devront d'autre part se demander si cette solution est économiquement recommandable.

Dans les centres industriels plus développés, la puissance optimum des centrales atomiques semble être de l'ordre de 70 000 à 75 000 kW.

Conclusions

Le Brésil, qui possède d'abondants gisements de minerais uranifères et thorifères, mais dont les ressources en autres combustibles convenant à la production d'énergie sont insuffisantes, passe rapidement d'une économie agricole à une économie industrielle. Les piles nucléaires servant à produire de l'électricité seront donc de la plus extrême importance pour le pays.

C'est pourquoi le Conseil national de la recherche et son Comité de l'énergie atomique élaborent d'ores et déjà un plan de prospection systématique et de traitement industriel des minerais uranifères, et s'occupent en même temps d'assurer la formation d'un personnel spécialisé dans ce domaine.

L'accroissement de la production d'électricité est une condition fondamentale du développement industriel du Brésil, et l'énergie atomique jouera, à n'en pas douter, un rôle très important dans le progrès futur de l'économie brésilienne.

BIBLIOGRAPHIE

1. Conselho Nacional de Aguas e Energia, statistiques.
2. Conselho Nacional de Petróleo (Petrobrás), statistiques.
3. Divisao de Aguas e Energia, Ministério da Agricultura.
4. Banco do Desenvolvimento Econômico, Rapport.
5. Anuário Brasileiro de Economia Florestal, 1950.
6. Instituto do Açucar e do Alcool, statistiques.
7. Mattos Gen. B. C. de, *Fastigio do Atomo*, Rio de Janeiro, 1946.
8. Mattos Gen. B. C. de, *Aspectos Econômicos da Energia Atômica*, Min. e Metalurgia, 1951, Vol. XV, nº 88.
9. Smith's Report, Princetown University Press, 1945.
10. Stephens, *Nuclear Fission and Atomic Energy.*
11. Menke J. R., *Nuclear Fission as a Source of Power.*
12. Le Baron R., U. S. News & World Report, 25 juin 1954.
13. Empresas Elétricas Brasileiras, Rapports annuels.
14. The Rio de Janeiro Tramway Light & Power, Ltd., Rapports.
15. Oliveira A. B. de, *Consumo de Energia no Brasil*, Engenharia, 1955, 13e année, vol. XIII, nº 146, Sao Paulo.
16. Berenhauser Gen. C., *Aspectos do Problema da Energia*, Observador Econômico e Financeiro, 1953, nos 213 et 214, novembre-décembre.
17. Observador Econômico e Financeiro, nº 23, avril 1955.
18. Potsh W., *O Brasil e suas Riquezas*, Rio de Janeiro, 1954.

Rôle de l'énergie électronucléaire dans la République Argentine

par Pedro E. Iraolagoitia *

La résolution 810, adoptée le 4 décembre 1954 par l'Assemblée générale des Nations Unies, a déterminé notre pays à participer à la présente Conférence internationale avec enthousiasme et sincérité. Nous sommes absolument convaincus que les conclusions auxquelles elle aboutira marqueront de nouveaux progrès dans la voie de la coexistence pacifique de toutes les nations, cette cause pour laquelle se dépensent sans relâche les hommes d'État et les peuples du monde entier.

Ayant pleine conscience des buts élevés de la présente Conférence internationale, nous nous permettons d'apporter notre modeste contribution, en exposant la situation actuelle, les besoins et les ressources de notre pays en ce qui concerne l'utilisation pacifique de l'énergie atomique. Cette étude est fort succincte, en raison du peu de temps dont nous disposions, mais elle pourra être complétée si les représentants des autres nations le désirent.

POSSIBILITÉS D'UTILISER L'ÉNERGIE ÉLECTRONUCLÉAIRE EN ARGENTINE

Dans la République Argentine, les centres de production et de consommation d'énergie sont situés à la périphérie; en outre il existe, à peu près au centre géographique du pays, une importante concentration industrielle dont les besoins en énergie vont croissant; or il n'existe pas de ressources importantes en énergie dans la région.

Si l'on compare une carte (fig. 1) des ressources énergétiques de l'Argentine, exprimées en pourcentages selon les régions, et une carte des centres de consommation selon leur importance, on constatera que les pourcentages des ressources et ceux de la consommation ne coïncident que dans trois cas. En raison des énormes distances qui séparent les deux grands centres de production, il est évident que l'énergie, pour être utilisée, doit être transportée à l'un ou l'autre de ses stades de transformation et qu'il en résulte nécessairement des dépenses élevées. Ces dépenses, qui viennent s'ajouter aux très importants investissements qu'exige l'exploitation rationnelle des ressources en énergie du pays, ont obligé les pouvoirs publics à recourir à des moyens de remplacement pour répondre aux besoins en énergie de la région orientale. De ce fait, cette région doit être alimentée en combustible nécessaire à cette production d'énergie. Ce combustible, dans une proportion qui va jusqu'à 50 pour cent, doit être amené des ports de débarquement, qui sont tous situés sur le littoral atlantique et sur le Paraná.

Étant donné : *a*) l'insuffisance de la production nationale d'énergie; *b*) les distances énormes sur lesquelles il faut transporter l'énergie, et *c*) le déséquilibre entre les zones de production et les zones de consommation, le rôle que l'énergie électronucléaire sera amenée à jouer dans le développement du pays est évident. On peut même prédire que son introduction progressive en vue de corriger ou de pallier l'influence défavorable exercée par les trois facteurs ci-dessus sera d'une importance capitale.

RESSOURCES DU PAYS EN MATIÈRES PRODUCTRICES D'ÉNERGIE

Pour illustrer ce qui précède, nous indiquons ci-après, par zone et par source de production, les quantités extraites et les réserves évaluées de matières productrices d'énergie.

Pétrole

Gisements	Production effective (m³ par an)	Évaluation des réserves (millions de m³)
Comodoro Rivadavia . .	2 820 300	66,6
Neuquén	761 000	11,2
Mendoza	855 000	30,3
Salta	95 100	19,5

Gaz naturel

Gisements	Production effective (millions de m³ par an)
Comodoro Rivadavia	757,7
Neuquén	113,8
Mendoza	21,4
Salta	39,2

Original : espagnol.

* Commission nationale de l'énergie atomique, Argentine.

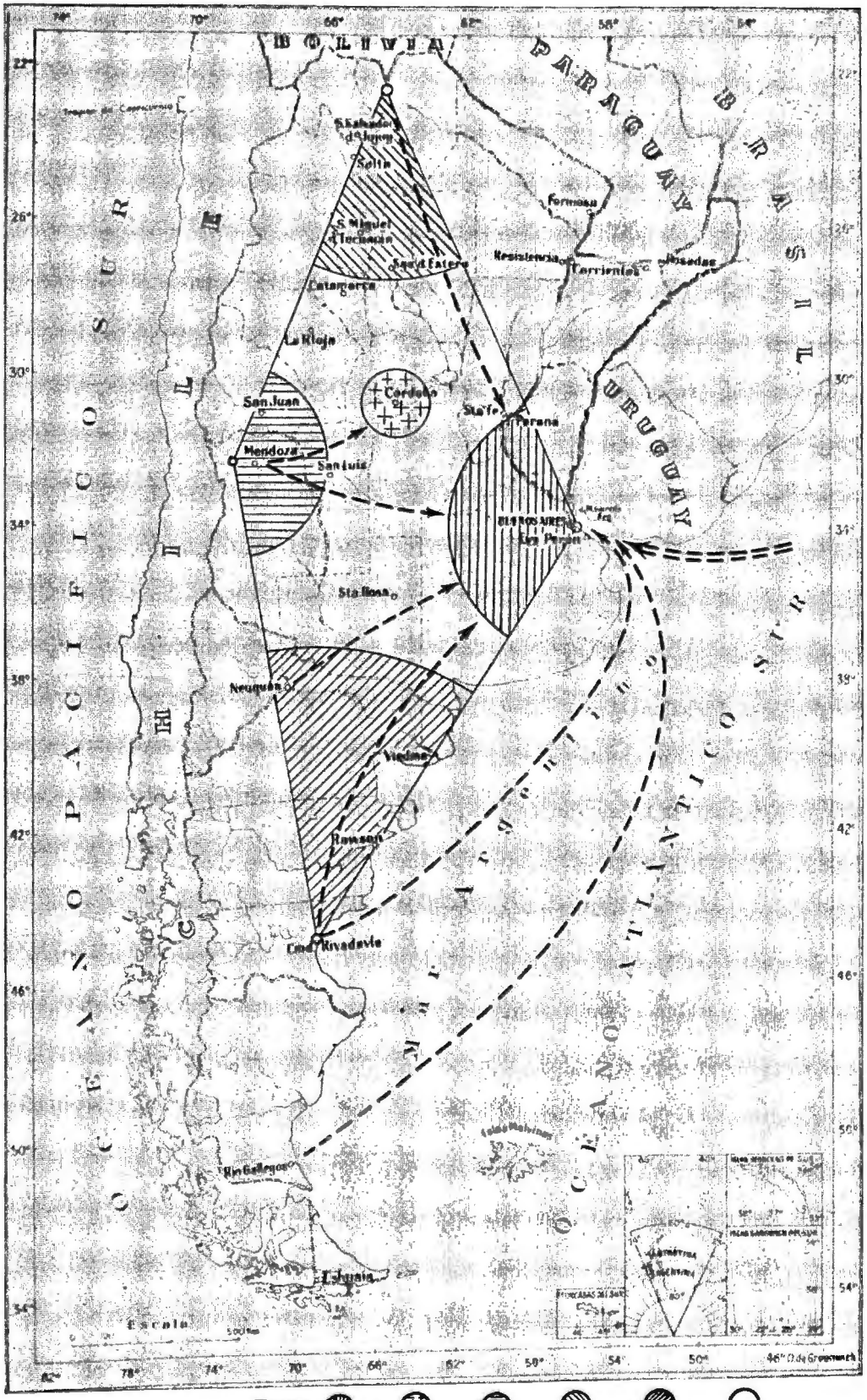


Figure 1. — Zones de consommation d'énergie.

Charbon

Gisements	Production effective (tonnes par an)	Évaluation des réserves (tonnes)
Rio Turbio (Santa Cruz)	63 670	350 000 000

Hydroélectricité

Bassins	Production effective (kW)	Potentiel réel (kW)
Rio Negro-Rio Colorado	4 040	2 500 000
Mendoza	23 170	2 100 000
Centre	27 890	350 000
Nord	8 150	500 000
Littoral	1 500	1 550 000

Si l'on inscrit un quadrilatère à l'intérieur des frontières du pays, on remarquera que les régions à forte concentration industrielle sont situées aux sommets et au centre de cette figure, et que la quasi-totalité de l'industrie nationale se trouve dans les zones hachurées (voir fig. 1). D'autre part, il est intéressant d'observer que 80 pour cent de la population du pays sont fixés dans le périmètre de ce quadrilatère imaginaire, qui contient en effet de vastes superficies de terres propres à la culture et à l'élevage.

Les déplacements de matières premières servant à la production d'énergie (pétrole, gaz et charbon) se font suivant les trajets indiqués par une ligne pointillée simple; cette ligne est double lorsqu'elle représente les importations. La région orientale consomme environ 90 pour cent de ces matières premières, et les centres de production d'énergie qui l'alimentent, abstraction faite des centres situés hors du pays, en sont séparés par les distances suivantes :

Nord . . . . . 1 900 km par terre
Mendoza . . . . 1 000 km par terre
Neuquén . . . . 1 000 km par terre
Sud . . . . . 1 500 km par mer

L'un des objectifs fondamentaux du deuxième plan gouvernemental, actuellement en pleine exécution en Argentine, est la concentration de l'industrie dans certaines régions; il est une cause de préoccupation permanente pour les autorités compétentes.

BESOINS ACTUELS ET FUTURS EN ÉNERGIE

Grâce à l'excellente architecture du plan gouvernemental mentionné précédemment, il est possible de calculer le coût réel et les incidences financières de la réalisation de chacune des étapes économiques dudit plan; l'une de ces étapes (voir chap. VII G. 2*a* de ce plan) : « Prix de revient des biens et services », est étroitement liée au problème qui nous occupe. D'après les prévisions établies à ce chapitre, prévisions qui, au demeurant, ont force de loi, nous pensons que les zones nord, ouest et sud, qui ont directement accès à d'excellentes ressources en énergie, n'auront pas besoin d'énergie nucléaire dans le proche avenir, sans que cela porte préjudice à leur développement, qui doit se poursuivre à un rythme toujours plus rapide. Il faut préciser que les trois zones en question groupent bon nombre des industries extractives du pays; l'activité de ces industries est largement encouragée par le deuxième plan gouvernemental et par la loi nº 14222 concernant les investissements de capitaux étrangers de sorte qu'on peut prévoir, sans grand risque de se tromper, qu'une grande partie des sources d'énergie situées dans ces régions alimenteront l'industrie locale dans l'avenir. Ainsi, dans ces régions, le but désiré aura été atteint, puisqu'elles pourront pourvoir à leurs propres besoins en énergie.

Les possibilités d'utilisation de l'énergie nucléaire restent donc limitées aux régions du centre et de l'est et à des superficies déterminées du quadrilatère imaginaire; cette utilisation visera surtout à développer l'électrification rurale et la traction électrique des chemins de fer. Voyons donc, en nous fondant sur les conceptions énoncées précédemment, quel est l'ordre de priorité à établir, et aussi quelle sera la consommation probable d'énergie nucléaire dans le proche avenir. Il ne fait pas de doute que la zone du centre, dont les ressources hydroélectriques sont exploitées au maximum et qui se trouve éloignée de toute autre source d'énergie, aura la priorité en matière d'énergie nucléaire. Le gouvernement a déployé d'énormes efforts pour que le pays parvienne à faire face par ses propres moyens à ses besoins en énergie et à l'accroissement constant de la demande de la zone orientale, qui fait venir une grande partie de ses matières premières de l'extérieur. En tenant compte de ces efforts, nous pouvons déterminer le rôle futur de l'énergie nucléaire dans le développement industriel et économique du pays. Ce rôle sera encore plus évident si nous déclarons que la quasi-totalité de la population rurale vit sur le territoire compris dans les zones du centre, de l'est et du sud, et que près de 90 pour cent du réseau ferroviaire national se trouvent concentrés dans ces mêmes zones.

Onze millions de personnes vivent sur ce territoire, et la consommation annuelle d'électricité y est de quelque 500 kilowattheures par habitant; elle devrait atteindre en tout cas 1.000 kilowattheures par habitant, chiffre accepté par tous les services compétents qui s'occupent de planification et de prévision des besoins. En bref, à supposer qu'en 1980 la consommation par habitant ait doublé, nous en venons à conclure que l'apport supplémentaire d'énergie devra être de trois à quatre fois supérieur à la production actuelle, soit de l'ordre de 3,5 à 5,0 millions de kilowatts, dont la moitié au moins sera fournie par l'énergie nucléaire.

RESSOURCES EN MATIÈRES PREMIÈRES POUVANT SERVIR A LA PRODUCTION D'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

L'Argentine a commencé la réalisation de son plan de production d'énergie nucléaire en cherchant à se procurer les minéraux nécessaires. Si l'on n'a pas rencontré de gisements d'uranium très importants, au moins l'existence de sept gisements en cours d'exploitation permet-elle d'espérer que la nature a doté l'Argentine de ressources suffisantes en minéraux radioactifs.

Le cubage de certains de ces gisements a permis de vérifier l'existence de réserves de minerai de titre satisfaisant, atteignant plusieurs centaines de tonnes d'oxyde d'uranium et garantissant la réalisation des plans pendant plusieurs années. Les explorations générales et particulières se poursuivent activement, et les résultats qu'elles ont donnés viennent étayer notre conviction que le pays sera en mesure de pourvoir à ses propres besoins en uranium. Un gisement de thorium, dont les filons semblent très riches, a été découvert dernièrement et les recherches s'y poursuivent. Quant aux autres matières premières, notamment le béryllium, il y a lieu de souligner que notre pays en est l'un des grands producteurs mondiaux et que des installations de traitement de l'oxyde et d'autres composés de ces minerais entrent actuellement en service. D'autre part, il existe dans certaines régions du pays des sources géothermales dont les caractéristiques sont très bonnes, et leur utilisation éventuelle pour la fabrication d'eau lourde est actuellement étudiée avec le plus grand soin. On a découvert également d'importants gisements de lithium, sur lesquels des recherches détaillées se poursuivent. Il résulte de tout ce qui précède qu'en ce qui concerne les matières utilisables pour la production d'énergie nucléaire, le pays peut envisager l'avenir sans grande appréhension.

FORMATION DU PERSONNEL SPÉCIALISÉ DANS LES QUESTIONS NUCLÉAIRES

Pour faire face au développement de ses programmes de travail, la Commission nationale de l'énergie atomique a dû envisager le problème capital de la formation adéquate du personnel. Étant donné que la formation universitaire des étudiants intéressés ne suffit pas à garnir complètement les cadres dans les diverses spécialités nécessaires, car il s'agit de matières et même de disciplines nouvelles, et que d'autre part certaines industries nationales intéressées directement aux plans de cette nature n'ont jusqu'ici qu'une expérience très brève en la matière, la Commission nationale a dû consacrer une attention spéciale et des efforts constants à la formation et au perfectionnement de son personnel. Des spécialistes étrangers, invités spécialement à cet effet, ont collaboré à cette tâche ardue, et des savants et techniciens argentins ont été envoyés à l'étranger dans des centres spécialisés où ils ont pu acquérir plus rapidement une meilleure formation. Les spécialistes étrangers de diverses nationalités n'ont pu rester dans nos laboratoires que pendant des périodes relativement brèves, mais ils ont laissé une somme d'enseignements profitables, grâce à la préparation préalable de notre personnel et aux installations et aux ressources dont nous disposons. La durée du séjour de nos savants et techniciens à l'étranger a varié de quelques mois à deux ans, lorsqu'il s'agissait de spécialistes déjà formés qui désiraient étudier ou approfondir une question déterminée. Nous nous rendons compte que la formation adéquate du personnel revêt une importance capitale et primordiale si nous voulons atteindre le but essentiel que nous nous sommes fixé : obtenir de l'énergie nucléaire en employant des piles d'un modèle satisfaisant et économique, et utiliser cette énergie à des fins pacifiques et humanitaires. Les progrès réalisés à ce jour donnent une idée des difficultés qui ont été surmontées, et, encore qu'il reste beaucoup à faire, la manière dont cette tâche a été accomplie permet d'espérer que notre mission aura dûment été remplie dans un avenir proche.

PLANS A COURT ET A MOYEN TERME

Après avoir étudié les possibilités de produire et d'utiliser de l'énergie nucléaire en Argentine, ainsi que les capacités professionnelles du personnel se livrant à ces travaux, les services responsables de ces activités ont franchi l'étape essentielle consistant à élaborer des plans de travaux adaptés aux conditions du pays. L'Argentine ne peut dès l'abord planifier son développement électronucléaire en prévoyant l'utilisant initiale de combustibles enrichis. Le montage d'usines de séparation des isotopes de l'uranium représenterait un effort trop épuisant dans le cadre des activités nationales; d'autre part, l'emploi de piles servant exclusivement à la conversion présente deux aspects négatifs qui revêtent une certaine importance à nos yeux : la consommation considérable d'énergie nécessaire à leur refroidissement et la nécessité absolue de disposer immédiatement d'usines de plutonium. Pour ces raisons, le programme initial de production d'énergie nucléaire a été basé sur l'emploi de l'uranium naturel provenant de minerais argentins et entièrement préparé, traité et purifié dans le pays. En fait, l'existence de quantités suffisantes de combustible nucléaire et la connaissance voulue des méthodes de fabrication de ces éléments combustibles ont été les facteurs essentiels sur lesquels s'est fondée la technologie nucléaire en Argentine. Sans poser des prémisses auxquelles il serait difficile de s'en tenir, nous pouvons indiquer que le choix des matériaux modérateurs doit nécessairement être d'importance secondaire dans les piles thermiques dont nous sommes obligés d'envisager l'emploi au départ. Ce qui importe, c'est la quantité de tonnes d'uranium disponibles qui ont été traitées de façon appropriée, la quantité de chaleur qu'on

peut en extraire et leur niveau thermique, et, en dernière analyse, les moyens financiers dont le pays dispose pour faire face au coût de tout le matériel complémentaire nécessaire.

Si nous choisissons en principe d'utiliser dans les premières piles le graphite dense comme ralentisseur, c'est parce qu'il est facile de s'en procurer et qu'il nous permet de poursuivre rapidement la réalisation de nos plans. Nous n'avons pas oublié le béryllium ou l'eau lourde qui joueront nécessairement un rôle important dans l'avenir, et que nous sommes en mesure de produire en grandes quantités ainsi que l'ont prouvé les recherches effectuées dans ce domaine. Compte tenu de notre production initiale d'uranium, de son augmentation future et du coefficient de conversion, nous supposons qu'en 1980 il sera largement possible de produire l'énergie supplémentaire dont le pays aura besoin, à savoir 2,5 millions de kilowatts installés, quantité d'énergie qui a été évaluée comme nécessaire. Il s'agit d'élaborer un plan d'application immédiate qui, outre la construction de piles de diverses puissances, mette notre personnel en mesure de s'attaquer à des entreprises plus audacieuses.

C'est pourquoi les pouvoirs publics ont envisagé la construction de piles de recherche destinées aux diverses universités du pays, de manière que celles-ci puissent former un personnel au courant de toutes les techniques de la recherche nucléaire. Deux plans sont élaborés en vue de la production d'énergie, le premier portant sur une période de douze ans qui se terminera en 1968, et l'autre devant étendre ses effets, dans l'état actuel du projet, jusqu'en 1980, c'est-à-dire jusqu'à une date où la technique de l'atome devrait avoir atteint son plein développement. Il n'est pas envisagé de plans allant au-delà de 1980, car les évaluations deviendraient alors très hasardeuses.

Selon le premier de ces deux plans, les travaux commenceront avec la construction d'une centrale électronucléaire produisant 15 mégawatts. Toutes les caractéristiques de cette centrale sont calculées avec la prudence que nous nous sommes donné pour règle d'observer jusqu'à ce que nous ayons acquis plus d'assurance et de connaissances en la matière. Ces plans, qui pourront encore être modifiés si nous parvenons à établir une collaboration concrète avec des pays plus avancés dans ce domaine, n'expriment rien d'autre que notre très ferme volonté de réaliser de rapides progrès en tous les aspects de la technologie nucléaire et de rendre à notre pays le service essentiel qui consiste à assurer à un peuple un approvisionnement suffisant en énergie.

Dès que la première usine de 15 mégawatts sera installée, celles qui suivront seront construites en tenant compte essentiellement de critères économiques et géographiques, et leurs coûts de production devront leur permettre de soutenir la concurrence des centrales de type classique. Pour cela, notre production annuelle d'uranium doit être accrue vers la fin de la période décennale et portée au-delà de 100 tonnes, à moins que ne surviennent des faits qui modifient les conditions de l'utilisation, chose toujours possible à la phase initiale où nous nous trouvons.

Notre foi en la coexistence pacifique de l'humanité, coexistence dont le désir est manifesté de mille façons par chacune des délégations qui composent la présente Conférence, nous fait également un devoir d'exprimer nos convictions et nos désirs les plus profonds.

Nous croyons en toute sincérité en l'énergie atomique en tant que moyen d'assurer le développement économique des pays.

Nous estimons qu'il est indispensable d'utiliser cette énergie pour préserver et améliorer les conditions de vie de l'humanité.

Nous souhaitons avec ferveur que les relations nouées dans l'atmosphère cordiale de la présente Conférence ouvrent de nouvelles voies à la compréhension et à la fraternité des peuples.

Nous désirons de toutes nos forces que l'énergie atomique soit utilisée exclusivement dans un esprit constructif et serve à faire régner le bien-être, l'union et la concorde.

Les possibilités économiques de l'énergie d'origine nucléaire

Bref exposé des méthodes et des résultats d'études économiques relatives au marché futur de l'énergie nucléaire

par K. M. Mayer

L'objet du présent mémoire est d'exposer une série d'études économiques relatives à l'énergie nucléaire que l'auteur a faites au cours de plusieurs années. Une grande partie de ces études a servi à rédiger un ouvrage intitulé « Étude des possibilités économiques de l'énergie nucléaire au sein de l'industrie de l'énergie électrique aux États-Unis d'Amérique »; dans cet ouvrage, présenté à l'Université de New York parmi les travaux requis pour l'obtention du grade de docteur en philosophie (Ph. D.), l'auteur poursuivait trois objectifs principaux :

1. Faire apparaître l'importance et la nature du marché de l'énergie nucléaire au sein de l'industrie de l'énergie électrique des États-Unis d'Amérique;

2. Étudier et concevoir des méthodes permettant de faire apparaître l'importance et la nature du marché de l'industrie nucléaire aux États-Unis d'Amérique, ou dans d'autres pays dont la situation est comparable au point de vue de l'énergie;

3. Isoler les facteurs fondamentaux qui déterminent l'importance et la nature du marché de l'énergie nucléaire; estimer l'importance relative de chacun de ces facteurs; délimiter les zones d'incertitude et évaluer la sensibilité des résultats obtenus aux variations des divers facteurs à l'intérieur des zones d'incertitude.

L'auteur espère que les résultats de ces études économiques seront utiles à d'autres chercheurs du domaine de l'énergie nucléaire, dans le monde entier; il espère également que les méthodes d'analyse économique élaborées en prenant les États-Unis d'Amérique comme cas type pourront servir pour des études faites dans d'autres pays.

L'auteur se doit ici de faire état de l'aide qui lui a été apportée pendant ses années de recherche. C'est en particulier au cours de réunions presque quotidiennes avec d'autres membres de la Commission de l'énergie atomique des États-Unis d'Amérique que des idées ont pu se présenter et que les occasions se sont offertes de les reviser. De plus, des membres de facultés universitaires et d'organisations de recherche, des personnalités de l'industrie, des experts conseils et des membres de diverses organisations gouvernementales ont apporté à l'auteur un concours inestimable. Cependant, s'il est vrai que de nombreuses études n'auraient pas pu être menées à bonne fin sans l'aide qui lui fut apportée, l'auteur du présent mémoire n'en assume pas moins la pleine et entière responsabilité de cette étude ainsi que d'autres travaux.

On se servira abondamment, dans le présent mémoire, de notes et de travaux qui ont permis de rédiger l'étude déjà mentionnée sur « les possibilités économiques de l'énergie nucléaire au sein de l'industrie de l'énergie électrique aux États-Unis d'Amérique ». On présentera tout d'abord les conclusions générales, qui seront suivies de l'exposé d'une série de réserves ou de précisions, sous forme de conclusions secondaires. Les conclusions secondaires seront elles-mêmes suivies d'un exposé et d'une analyse des principales hypothèses faites au cours de cette étude. La discussion de ces hypothèses précède une brève esquisse de la méthode employée pour déterminer les possibilités économiques de l'énergie nucléaire.

L'auteur terminera son exposé par des considérations relatives à l'importance de l'analyse économique pour le développement des applications de l'énergie nucléaire dans toute industrie ou tout pays donnés.

CONCLUSIONS

L'examen des différents débouchés qui s'offrent à une nouvelle source d'énergie montre que c'est dans le domaine des centrales électriques que son introduction sur le plan industriel est le plus probable. L'étude détaillée de l'importance et de la nature des débouchés de l'énergie nucléaire au sein de l'industrie de l'énergie électrique aux États-Unis d'Amérique a exigé l'analyse et la prévision à long terme des besoins et des ressources en énergie électrique selon la région géographique, la nature de la force motrice primaire, l'âge des installations, le coût et l'importance des centrales.

Original : anglais.

Prévisions à long terme de la demande d'énergie électrique

De nombreuses autorités dont Ayres [1]*, Putnam [2], la President's Materials Policy Commission [3], Electrical World [4], Barnett [5], Dewhurst [6], et l'Office of Defense Mobilization [7], ont établi des prévisions à long terme de la demande d'énergie électrique aux États-Unis d'Amérique. Aucune des prévisions ne satisfait aux exigences d'une étude des possibilités économiques de l'énergie d'origine nucléaire; c'est pourquoi on en a établi de nouvelles. La figure 1 présente une synthèse des prévisions de la demande; elle n'indique de valeurs que pour quelques années caractéristiques, mais les calculs ont été établis pour chaque année de 1955 à 1975. On remarquera que les régions de la Federal Power Commission (FPC) correspondent à des régions géographiques des États-Unis d'Amérique; elles seront définies de façon plus précise dans la suite du présent mémoire.

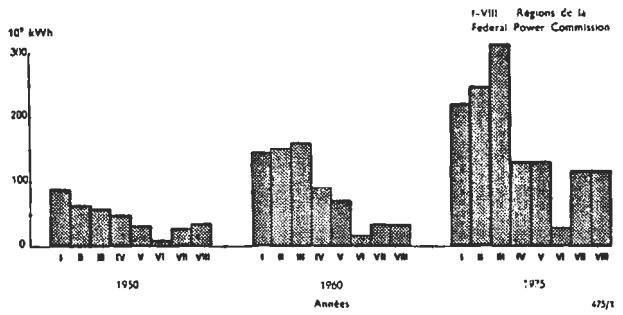


Figure 1. — Demande d'énergie électrique aux États-Unis d'Amérique, en milliards de kWh par an. Valeur de la demande dans le passé (1950) et prévisions pour l'avenir (1960 et 1970).

La figure 1 montre, pour toutes les régions des États-Unis d'Amérique, la demande dans le passé (1950) et la demande prévue (consommation escomptée) exprimées en milliards de kilowattheures par an. Il est intéressant de constater, non pas que l'on escompte *une augmentation* de la quantité d'énergie consommée dans chacune des régions des États-Unis d'Amérique, mais bien que l'on prévoit pour chaque région *un taux d'augmentation différent.* Alors que les régions I, II et III, par exemple, se classaient en 1950 dans l'ordre : 1, 2 et 3. on prévoit qu'elles se classeront dans l'ordre 3, 2 et 1 en 1975.

Prévisions à long terme de la production d'énergie électrique

Dans le paragraphe qui précède, de même qu'à la figure 1, on ne s'est occupé que de l'augmentation de la demande d'énergie électrique aux États-Unis.

* Les numéros entre crochets renvoient à la bibliographie qui figure à la fin du mémoire.

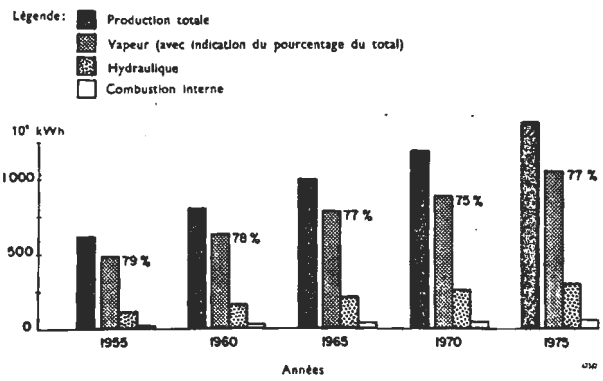


Figure 2. — Prévisions de la production d'énergie électrique, en milliards de kWh par an, selon la nature de la force motrice primaire.

Dans les paragraphes qui suivent, on va examiner la façon dont cette demande croissante sera satisfaite d'une année à l'autre dans l'hypothèse où l'énergie électrique d'origine nucléaire n'interviendrait que pour une fraction peu importante dans la production d'énergie électrique.

La figure 2 illustre les prévisions annuelles de la quantité d'énergie électrique produite par les moyens classiques. Pour chaque année à venir, la production totale est représentée par des colonnes différentes selon les principales catégories de centrales : centrales thermiques à vapeur, centrales hydrauliques et centrales à combustion interne.

La figure 2 montre que l'on prévoit que l'importance relative de chacun de ces types de centrales demeurera à peu près la même au cours des vingt prochaines années. On pense cependant que la production relative des centrales thermiques va diminuer d'abord, mais dans une faible mesure, pour augmenter de nouveau à partir de 1970; ceci tient au fait que bien des sites exploitables du point de vue hydroélectrique seront encore à même de soutenir la concurrence pendant la période de 1960 à 1970, même après la réalisation de nombreuses centrales hydrauliques en projet.

Pour chaque type de centrale, les éléments constitutifs du prix de revient de l'énergie constituent un ensemble caractéristique. En fonction, par exemple, de l'importance et de la nature de l'installation, ce prix est différent pour les centrales à vapeur, hydrauliques ou à combustion interne. Pour un coût de production donné, les possibilités commerciales de l'énergie nucléaire dépendront du prix de revient électrique provenant d'autres sources; celui-ci dépend à son tour de la quantité et de la nature de l'énergie qui sera produite dans l'avenir.

Dans une section suivante, on examinera de façon plus détaillée les méthodes employées pour calculer les quantités d'énergie électrique qui seront produites par les différentes sources primaires, ainsi que les prix de revient respectifs.

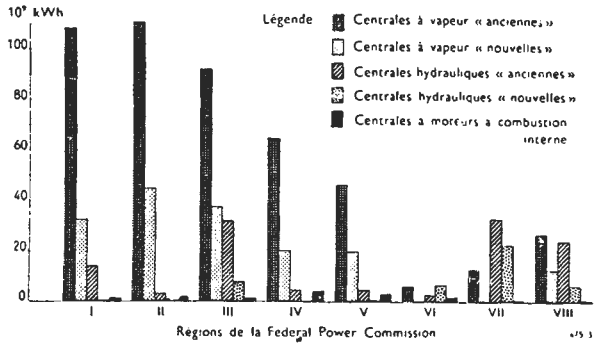


Figure 3. — Analyse par région, pour l'année 1960, des prévisions de la production d'énergie électrique, en milliards de kWh, selon la nature de la force motrice primaire.

Analyse des prévisions de la production d'énergie électrique selon les régions

On a pu voir, à la figure 2, les prévisions de la production d'énergie électrique pour les trois sources primaires, établies pour des intervalles de cinq ans et pour l'ensemble des États-Unis d'Amérique. La figure 3 montre comment on a continué à analyser l'importance et la nature du marché de l'énergie nucléaire. Comme on l'indique pour une seule année (1960), la production totale d'électricité prévue a été analysée suivant la région géographique, la nature de la force motrice primaire et l'âge des installations.

Dans le présent document, on entend par « centrale ancienne » une centrale construite en 1955 ou auparavant, et qui sera encore en service en 1960; les installations construites entre 1955 et 1960 seront qualifiées de « centrales nouvelles ». Cette distinction est très importante : en effet, on admettra qu'une centrale électronucléaire pourra entrer en concurrence avec une centrale « nouvelle » de type classique à la condition que les *frais totaux* (frais fixes plus frais variables) soient comparables, tandis que, pour qu'elle puisse concurrencer une centrale « ancienne », ce sont les frais variables *(out-of-pocket costs)* seuls qu'il faudra comparer.

Ainsi que le montre la figure 3, l'importance relative des centrales thermiques à vapeur anciennes, mesurée par l'énergie produite, sera, en 1960, prépondérante. La production prévue pour les centrales thermiques à vapeur nouvelles sera d'une importance secondaire. Toutefois, ces affirmations ne sont valables que si l'on considère les États-Unis d'Amérique dans leur ensemble. On voit en effet que, dans les régions occidentales du pays, c'est l'énergie hydroélectrique qui revêtira une très grande importance; elle passera même en tête dans la région VII (Pacifique nord-ouest).

L'analyse qu'illustre, pour 1960, la figure 3, a été faite également — pour toutes les catégories de source primaire et toutes les régions des États-Unis d'Amérique — pour les années 1965, 1970 et 1975. Après qu'on eut établi la prévision à long terme des quantités d'énergie électrique nécessaires, l'étude du problème exigeait l'examen détaillé du prix de revient de l'énergie électrique provenant de chaque source.

Analyse, selon les régions, du prix de revient de l'énergie électrique produite dans les centrales à vapeur « nouvelles »

L'exposé et le graphique qui précèdent ont fait connaître les *quantités* d'énergie qui seront produites, selon les prévisions, dans chacune des régions des États-Unis d'Amérique. Bien qu'une région qui continue à produire (et à consommer) de grandes quantités d'énergie électrique *puisse* offrir un vaste marché possible pour l'énergie nucléaire, l'attraction qu'exerce ce marché — ou le secteur de ce marché où peut se manifester la concurrence de l'énergie nucléaire — dépendra, toutes choses restant égales, des prix de revient locaux. Dans les paragraphes suivants, nous allons étudier les prix de revient prévus pour les « nouvelles » centrales thermiques à vapeur en 1960.

Ainsi qu'on peut le voir dans le diagramme polaire suivant (figure 4), les prix de revient de l'électricité produite dans les centrales thermiques à vapeur qui seront construites entre 1955 et 1960

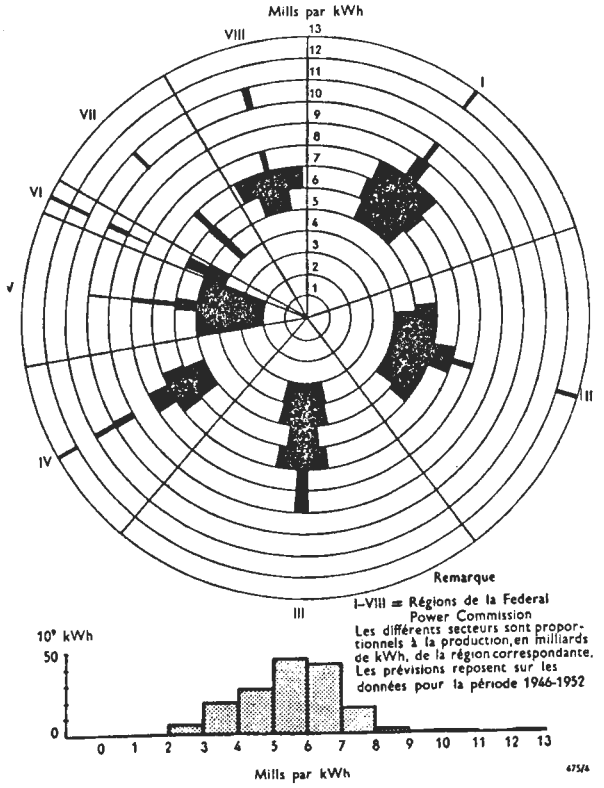


Figure 4. — Analyse par région, pour l'année 1960, des prix de revient de l'énergie électrique produite dans les centrales à vapeur « nouvelles ».

seront différents pour chacune des régions des États-Unis d'Amérique. Plus le « centre de gravité » de chaque distribution indiquée sur ce graphique est proche du centre du diagramme, plus le prix de revient de l'énergie électrique produite dans la région considérée est faible. La surface noire de chaque secteur est proportionnelle à la production des centrales thermiques à vapeur nouvelles, dans chacune des régions de la Federal Power Commission, en 1960, tandis que la surface totale de chaque secteur est proportionnelle à la quantité totale d'énergie qui sera produite, selon les prévisions, dans la région correspondante. Le rapport entre les surfaces noires et les surfaces blanches du diagramme polaire est donc égal, pour chaque région, au rapport entre la production des centrales thermiques à vapeur, prévue pour 1960, et la production totale d'énergie électrique prévue pour la même année. On remarquera que la région VII, qui est une région à prédominance hydroélectrique, ne présente qu'une faible surface noire, tandis que dans les régions II et V, c'est au contraire l'énergie d'origine thermique qui l'emporte.

Bien que plusieurs régions à forte consommation d'énergie doivent comprendre des centrales thermiques à vapeur « nouvelles », dans lesquelles le prix de revient de l'énergie électrique s'élèvera jusqu'à 12 mills * le kilowattheure, le diagramme polaire montre que les quantités d'énergie qui, selon les prévisions, doivent être produites avec un prix de revient élevé (périphérie du diagramme) sont relativement faibles. La répartition des prix de revient qui est représentée au bas de la figure 4 a été obtenue en additionnant les indications du diagramme polaire pour toutes les régions. On remarquera que, pour la période comprise entre 1955 et 1960, il y a lieu de prévoir qu'une faible partie seulement de l'énergie électrique engendrée dans les centrales à vapeur « nouvelles » sera produite à un prix de revient global excédant 8 mills par kilowattheure.

L'analyse illustrée par la figure 4 concerne les centrales thermiques à vapeur « nouvelles », pour l'année 1960. Des analyses similaires, se rapportant aux centrales à vapeur « anciennes », aux centrales hydrauliques « anciennes » et « nouvelles » et aux centrales à moteurs à combustion interne, ont été faites pour chacune des années 1960, 1965, 1970 et 1975. On indiquera plus loin les méthodes qui ont été employées pour évaluer les prix de revient de la production future d'énergie électrique. La figure 5 illustre la synthèse de l'estimation des possibilités économiques de l'énergie d'origine nucléaire appliquée à la production de l'énergie électrique, pour l'année 1960.

L'ampleur du marché qui s'offre à l'énergie d'origine nucléaire

Comme nous l'avons déjà indiqué, l'énergie nucléaire, pour s'assurer une position sur le marché

* 1 mill = 1 millième de dollar.

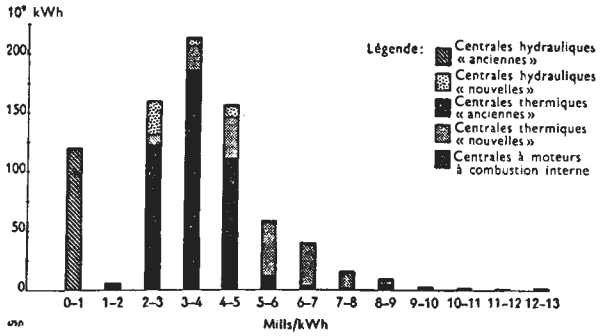


Figure 5. — Ampleur du marché de l'énergie d'origine nucléaire, en 1960, en milliards de kWh, selon la nature de la concurrence et le prix de revient.

national de l'énergie électrique, devra entrer en compétition avec les sources d'énergie qui font appel aux combustibles classiques. Toutes choses égales, la portion du marché que l'énergie nucléaire pourra accaparer dans l'avenir dépendra des prix de revient relatifs de l'électricité de diverses provenances. A la figure 4, les prévisions du prix de revient de l'énergie électrique produite en 1960 dans les centrales à vapeur « nouvelles » ont été présentées sous la forme de la répartition des quantités d'énergie électrique produite, pour diverses valeurs du prix de revient en mills par kilowattheure. Des répartitions du même genre ont également été calculées pour d'autres catégories de stations centrales.

La figure 5 donne une vue d'ensemble des prix de revient prévus pour toutes les catégories de centrales, pour l'année 1960. On a ainsi une représentation valable à l'échelle nationale, pour tous les types de centrales et pour toutes les régions; une représentation analogue a été établie par ailleurs pour les années 1965, 1970 et 1975.

On remarquera, en examinant la figure 5, que les tranches d'énergie correspondant à un prix de revient supérieur à 7 mills le kWh sont relativement faibles. En admettant même que l'énergie nucléaire puisse remplacer les sources classiques pour toutes les tranches dont le prix de revient est supérieur à 8 mills le kWh, sa part totale du marché demeurerait relativement peu importante. On peut encore voir que l'importance relative de chacune des sources classiques diffère d'une tranche à une autre : alors que la part des moteurs à combustion interne est relativement plus élevée dans les tranches supérieures de l'échelle des prix, les centrales thermiques à vapeur dominent aux échelons intermédiaires et l'importance de la production hydroélectrique augmente à mesure que le prix de revient s'abaisse.

On peut voir, par exemple, que si le prix de revient de l'énergie électronucléaire pouvait s'établir, aux barres de départ, à 8 mills le kWh, celle-ci pourrait disputer aux centrales à vapeur « nouvelles » et « anciennes », et aux centrales équipées de moteurs à combustion interne, une production d'environ

20 milliards de kilowattheures. Les possibilités économiques instantanées, pour 1960, de l'énergie d'origine nucléaire peuvent, de la même façon, se déduire de la figure 5 pour tous les autres prix de revient compris entre 0 et 13 mills le kWh, en fonction des diverses catégories de centrales.

Il nous faut insister de nouveau ici sur le fait que l'évaluation des possibilités commerciales de l'énergie d'origine nucléaire, représentée à la figure 5, a été faite dans l'hypothèse sur laquelle repose toute cette étude, à savoir que l'énergie d'origine nucléaire ne va pas s'introduire sur le marché d'une façon quelque peu importante, au cours des vingt prochaines années. Si le contraire devait se produire, cela entraînerait non seulement une répartition de la production des sources classiques différentes de celle qui apparaît à la figure 5, mais également une distribution différente des quantités d'énergie dans chaque tranche; l'ampleur du marché qui s'offre à l'énergie d'origine nucléaire serait modifiée dans une mesure qui dépendrait des possibilités offertes par l'énergie nucléaire elle-même, ou encore de la diminution du prix de revient de l'énergie électronucléaire.

On examinera plus loin avec plus de détails quelques-unes des principales hypothèses sur lesquelles repose l'évaluation des prix de revient futurs de l'énergie électrique aux États-Unis d'Amérique. Cette évaluation et la répartition des prix qu'elle permet d'établir comprennent un certain nombre de corrections ou d'ajustements destinés à tenir compte des effets de divers facteurs, tels que le degré d'utilisation des centrales, le taux futur de désaffectation des centrales, le type des constructions entreprises à l'avenir, les régimes de propriété et les formes d'exploitation envisagées.

Possibilités d'introduction de l'énergie d'origine nucléaire, selon les régions, au sein de l'industrie de l'énergie électrique aux États-Unis d'Amérique

On peut déduire de la figure 5 et de l'exposé qui s'y rapporte quelques observations d'ordre général concernant le secteur du marché pour lequel l'énergie nucléaire pourrait entrer en compétition, et cela, par rapport à diverses valeurs du prix de revient de l'énergie dans le futur. La figure 5 indique de plus la position qu'occupent sur le marché diverses catégories de producteurs et de concurrents éventuels de l'énergie nucléaire.

On donnera, dans les alinéas qui suivent, diverses évaluations des possibilités de l'énergie nucléaire, pour différentes valeurs du prix de revient, selon la région. La figure 6 a été établie d'après les données relatives aux années voisines de 1960; toutefois, les observations générales sont également valables pour un avenir plus éloigné.

Les indications de la figure 6 permettent de constater que, même si l'on abaissait le prix de

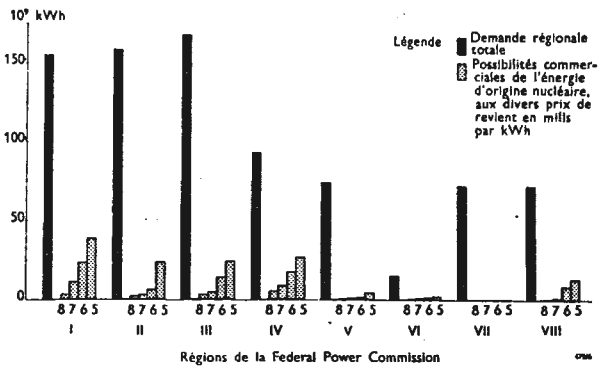


Figure 6. — Analyse des possibilités d'introduction de l'énergie d'origine nucléaire, selon les régions, dans l'industrie de l'énergie électrique aux États-Unis d'Amérique.

revient de l'énergie d'origine nucléaire jusqu'à une valeur de l'ordre de 8 mills par kWh, aucune quantité notable d'énergie électrique ne serait produite, dans une région quelconque des États-Unis d'Amérique, par des centrales nucléaires. Cependant, si l'on avait établi un graphique du même genre ne portant que sur les centrales « nouvelles », on aurait constaté une proportion élevée de nouvelles centrales thermiques nucléaires.

Si l'on réduit, par hypothèse, le prix de revient de l'énergie électronucléaire à 6 mills le kWh, l'avènement de l'énergie nucléaire devient beaucoup plus significatif dans la plupart des régions; toutefois, c'est dans la région I de la Federal Power Commission (partie nord-est des États-Unis d'Amérique) que s'offriraient les plus grandes possibilités commerciales. Bien que la fraction de l'énergie électrique totale produite au prix de 6 à 7 mills le kWh — coût total dans le cas des centrales nouvelles et coût variable dans le cas des installations anciennes — paraisse être faible, la quantité absolue d'énergie produite correspond encore à la production d'une grande industrie. Pour cette raison et pour d'autres, il faut souligner encore une fois que nous avons admis, dans le présent mémoire, que l'apport de l'énergie nucléaire ne sera pas considérable. Si toutefois le prix de revient de l'énergie électronucléaire était ramené aux environs de 6 mills le kWh, cela rabaisserait toute la structure des prix de revient de l'électricité et le marché de l'énergie revêtirait un aspect totalement nouveau.

Il faut considérer cependant, et c'est un aspect qu'il convient de souligner à nouveau, que les possibilités indiquées ne pourront être atteintes que dans les circonstances les plus favorables à l'énergie d'origine nucléaire. L'hypothèse implicite est très importante, à cet égard, selon laquelle l'énergie d'origine nucléaire pourrait s'emparer de toutes les possibilités de production au-dessus de 7 mills, par exemple, du moment que son prix de revient pourrait être ramené à cette valeur. Comme on l'a indiqué précédemment, une description rigoureuse du marché

qui s'offre à l'énergie nucléaire doit s'accompagner de nombreuses réserves. Dans les paragraphes qui suivent, on discutera, à titre d'exemple, l'influence de la puissance des centrales d'énergie sur les possibilités commerciales de l'énergie nucléaire.

Influence de la puissance des centrales sur les possibilités commerciales de l'énergie d'origine nucléaire

Dans les pages précédentes, nous avons admis de façon implicite que si l'électricité d'origine nucléaire était produite à un prix de revient de 8 mills par kWh, elle pourrait s'emparer de toutes les positions du marché occupées par les producteurs dont le prix de revient dépasse cette valeur. Comme il a été dit précédemment, il convient de faire des réserves sur les conclusions préliminaires, ou de rendre explicites les hypothèses de base. Nous allons essayer de faire l'un et l'autre.

Les conclusions préliminaires, ou générales, qui indiquent l'ampleur du marché s'offrant à l'énergie nucléaire, ne sont correctes que si le prix de revient de l'électricité d'origine nucléaire s'établit aux valeurs indiquées, au départ de *toutes les centrales, quelle que soit leur puissance.* La figure 7 montre l'importance de la puissance des centrales pour un prix de revient donné.

Le graphique en question montre que si l'électricité d'origine nucléaire produite avec un prix de revient de 8 mills par kWh doit remplacer toutes les tranches produites à un prix supérieur, elle devra elle-même être produite et distribuée par petites quantités. Toute l'électricité dont le coût varie entre 8,01 et 50 mills le kWh provient de centrales d'une puissance inférieure à 100 MW, et la plus grande partie provient même de centrales d'une puissance inférieure à 25 MW. En d'autres termes, si l'électricité d'origine nucléaire ne peut être produite au prix de 8 mills le kWh que dans des installations d'une capacité de 200 MW ou davantage, l'ampleur potentielle du marché de l'énergie nucléaire ne sera plus comprise entre 10 et 20 milliards de kWh, mais sera réduite à néant. Le marché pourra donc absorber l'énergie électrique d'origine nucléaire, soit au prix de 8 mills le kWh, si elle est produite par petites quantités, soit à un prix inférieur à 8 mills le kWh, si elle est produite par grandes quantités.

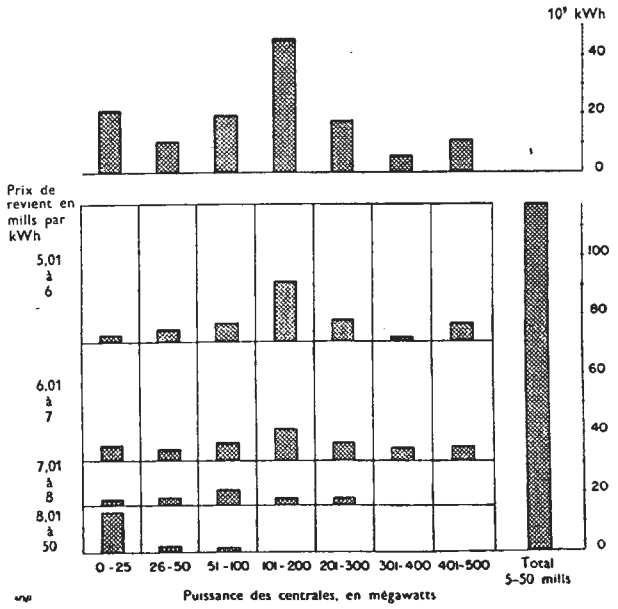


Figure 7. — Influence de la puissance des centrales sur le marché de l'énergie d'origine nucléaire au sein de l'industrie de l'énergie électrique aux États-Unis d'Amérique.

Il convient de remarquer ici que, dans un rapport aussi bref, on ne peut exposer les conclusions, les réserves, les détails et les procédés de vérification des hypothèses, toutes choses contenues dans les études économiques approfondies citées plus haut. Tout au plus peut-on donner quelques exemples typiques, tel que celui des effets de la puissance des centrales sur les possibilités commerciales de l'énergie nucléaire.

Analyse de la nature de la concurrence

La figure 7 et les alinéas précédents ont permis d'illustrer une des réserves qu'il faut faire lorsqu'on veut interpréter les possibilités économiques de l'électricité d'origine nucléaire décrites dans le présent mémoire. Comme on l'a signalé ci-avant, la puissance des centrales exerce une influence sensible sur les conclusions à tirer de l'examen des possibilités qui s'offrent à l'énergie nucléaire dans le cadre de l'industrie de l'énergie électrique aux États-Unis d'Amérique, particulièrement lorsque l'on considère les prix de revient qui excèdent 8 mills le kWh. En raison de l'importance de ce facteur, il convient d'étudier la nature de la concurrence et le type de production d'énergie électrique dans chacune des subdivisions entre lesquelles on peut répartir les centrales selon leur capacité.

La figure 7 indique les quantités d'énergie dont la production est prévue dans chacune des catégories de centrales, classées selon leur puissance, sans fournir aucun renseignement sur la nature de ces centrales. La figure 8 permet de voir que si l'électricité d'origine nucléaire peut être produite à 8 mills le kWh dans des installations de moins de 25 MW, on peut s'attendre à ce qu'elle concurrence avec succès l'électricité produite dans des centrales thermiques à vapeur ou par des moteurs à combustion interne. Toutefois, si l'électricité d'origine nucléaire essayait d'entrer en concurrence dans le secteur des grandes centrales d'énergie (de 50 à 300 MW), elle devrait affronter principalement la concurrence des centrales thermiques à vapeur. En ce qui concerne la production dans des stations encore plus puissantes, on doit s'attendre à ce que l'énergie nucléaire ne puisse s'assurer une position sur le marché qu'en

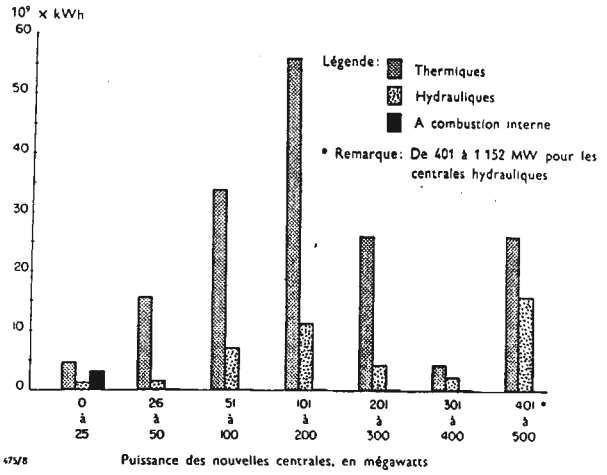


Figure 8. — Analyse de la puissance des nouvelles centrales, en milliards de kWh, pour 1960, selon la nature de la force motrice primaire.

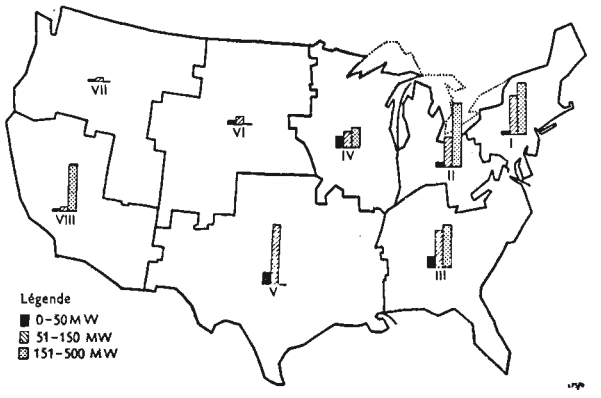


Figure 9. — Analyse de la puissance des centrales thermiques construites aux États-Unis d'Amérique depuis la guerre.

concurrençant tant les centrales thermiques à vapeur que les centrales hydrauliques.

On a décrit précédemment, sur la base de la figure 5, qui se rapportait à l'année 1960, la nature de la concurrence à laquelle l'énergie nucléaire devra faire face en fonction des prix de revient. Des tableaux ont été également dressés pour les années 1965, 1970 et 1975. A la base de tous ces tableaux, calculs et graphiques se trouvent des hypothèses concernant l'évolution future des diverses sources classiques d'énergie électrique. C'est ainsi que les données de la figure 5 ont été établies moyennant une correction qui tient compte de l'accroissement de la capacité de production d'énergie électrique aux États-Unis d'Amérique, tant par l'*extension des installations existantes* que par la construction de nouvelles centrales. Comme on peut s'y attendre, les frais par kilowatt sont plus bas lorsqu'on augmente la capacité d'une centrale existante que lorsqu'on crée une nouvelle centrale de puissance équivalente. C'est pourquoi, dans chaque tranche de prix, les possibilités économiques indiquées pour l'énergie d'origine nucléaire ont été diminuées de façon à tenir compte de ce genre de concurrence éventuelle.

Analyse de la puissance des centrales selon les régions

Dans le texte et dans les graphiques qui précèdent, on s'est fréquemment référé aux huit régions de la Federal Power Commission, et on a signalé plus haut que leurs frontières correspondent approximativement à celles de régions géographiques des États-Unis d'Amérique. La figure 9 définit les régions de la Federal Power Commission et fournit des indications supplémentaires utiles à ce stade de notre étude.

On remarquera que la puissance des centrales électriques à vapeur de l'après-guerre (1945-1953) diffère sensiblement d'une région à l'autre. Ceci tient évidemment aux différences de structure qui existent entre les marchés de l'électricité dans différentes parties des États-Unis d'Amérique. On observera avec intérêt, par exemple, que le prix de l'énergie électrique est élevé dans les états de l'est (voir la figure 4) et que c'est aussi dans ces états qu'a été construite une bonne partie des nouvelles grandes centrales. La combinaison de prix de revient élevés et de grands ensembles de production d'énergie tend à confirmer que c'est la moitié des États-Unis d'Amérique qui offre les débouchés les plus intéressants pour la production industrielle d'énergie électronucléaire.

Possibilités commerciales cumulées de l'énergie d'origine nucléaire

Jusqu'ici, la discussion a porté presque exclusivement sur les possibilités économiques instantanées de l'énergie d'origine nucléaire, ou sur le marché possible à un moment donné, par exemple les années 1960, 1965 ou 1970. La figure 10 donne les résultats d'une méthode d'addition utilisée pour évaluer le développement éventuel d'une industrie de production d'énergie électronucléaire, pour diverses valeurs du prix de revient.

On voit à la figure 10 que, si l'on pouvait dès aujourd'hui produire de l'énergie d'origine nucléaire, à 7 mills le kWh, et si l'on saisissait toutes les occasions qu'offre le marché d'installer des centrales électronucléaires, on pourrait escompter que les génératrices nucléaires produiront, en 1975, environ 100 milliards de kilowattheures, soit environ 6 pour cent de la production d'électricité des États-Unis d'Amérique. Et si le coût de production pouvait être réduit d'un mill, c'est-à-dire passer à 6 mills le kWh, le marché de l'énergie d'origine nucléaire, dans l'industrie de l'électricité, doublerait d'ampleur.

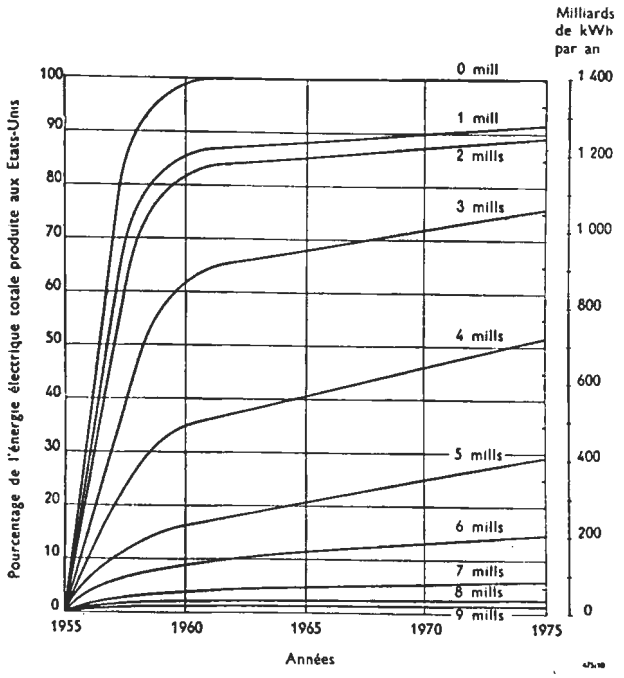


Figure 10. — Possibilités cumulées de l'énergie d'origine nucléaire (exprimées en fonction du coût de production de l'énergie électronucléaire, en mills par kWh, de 1955 à 1975).

Si, au contraire, le coût de l'électricité nucléaire s'établissait à 10 mills le kWh, il n'y aurait guère de raison d'*ordre économique* de stimuler le développement de la production d'électricité d'origine nucléaire aux États-Unis d'Amérique au cours des vingt prochaines années.

LES HYPOTHÈSES DE BASE

Les conclusions accompagnant les graphiques précédents comme ceux qui vont suivre, et qui sont formulées dans le texte qui s'y rapporte, reposent sur de nombreuses hypothèses. Il ne serait pas indiqué de rechercher, dans le présent document, à porter un jugement de valeur sur toutes ces hypothèses, ni même de les énumérer. Cependant, nous allons brièvement examiner quelques-unes des hypothèses principales, ainsi que leurs conséquences. La façon dont les conclusions obtenues varient lorsqu'on modifie les hypothèses présente ici un intérêt particulier.

La consommation future d'énergie électrique

La première hypothèse importante concerne la consommation future d'énergie électrique aux États-Unis. Comme nous l'avons indiqué précédemment, nous avons utilisé dans une grande mesure les prévisions à long terme de la demande d'électricité faite par la President's Materials Policy Commission (PMPC). Selon ces prévisions, on pourrait affirmer que le taux d'accroissement de la consommation d'énergie électrique enregistré au cours des dix dernières années va diminuer au cours des deux prochaines décennies. On peut démontrer qu'une surestimation ou une sous-estimation de 10 pour cent de la demande d'énergie électrique entraîne une surestimation ou une sous-estimation d'environ 15 pour cent des possibilités économiques de l'énergie d'origine nucléaire; on voit donc que les conclusions y relatives sont extrêmement sensibles aux variations des prévisions à long terme de la consommation d'énergie électrique.

Les prévisions à long terme concernant la puissance hydroélectrique

Étant donné que le rythme du développement des installations hydroélectriques aux États-Unis d'Amérique subit l'influence de nombreux facteurs tant économiques que non économiques, les prévisions à long terme de l'augmentation de la puissance hydroélectrique reposent nécessairement sur certaines hypothèses relatives à des événements futurs qui ne sont pas d'ordre économique. Heureusement, le rapport entre la puissance installée des centrales hydroélectriques et la puissance installée totale d'énergie électrique aux États-Unis d'Amérique, ainsi que les prix de revient respectifs de l'électricité d'origine hydraulique et des autres catégories d'énergie électrique sont tels que des erreurs d'estimation relativement grandes sur le développement futur de la production d'énergie d'origine hydraulique n'entraînent que des erreurs relativement faibles dans le calcul des possibilités de l'énergie d'origine nucléaire, particulièrement lorsqu'il s'agit des secteurs de production à prix de revient élevé.

Le taux futur de désaffectation des centrales

On affirme couramment, dans l'industrie des États-Unis d'Amérique, que la vie d'une centrale électrique est d'environ quarante ans. On pourrait donc en déduire que, chaque année, la puissance désaffectée (et remplacée par une nouvelle puissance) est égale à celle des installations mises en service quarante ans auparavant. Or, on a constaté que ce taux est beaucoup plus élevé que le taux réel, ou mesuré, qui a été enregistré au cours de la période de 1946 à 1953. On a donc admis que le taux de désaffectation constaté après la guerre se maintiendra pendant la période de 1955 à 1975; cependant, si c'était le taux de désaffectation calculé qui devait se vérifier à l'avenir, les possibilités précédemment indiquées pour les tranches d'énergie revenant de 7 à 8 mills le kWh seraient sous-évaluées d'environ 15 à 20 pour cent.

Le coût futur des combustibles fossiles

Les conclusions que nous avons formulées dans ce mémoire reposent sur l'hypothèse que l'on continuera à disposer aux États-Unis d'Amérique, pendant la période de 1955 à 1975, de combustibles

fossiles destinés à la production d'électricité, à des coûts réels égaux à ceux de 1953. Cette hypothèse implique que l'on continuera à utiliser à la fois le charbon, le gaz et le pétrole; il se peut cependant que les coûts réels de la production du gaz et du pétrole augmentent; il est même possible que les prix de ces deux combustibles augmentent au point d'inciter les producteurs d'électricité à recourir davantage aux combustibles solides. Comme on l'a montré précédemment, les possibilités commerciales s'offrant à l'énergie d'origine nucléaire qui serait produite en 1975 à un coût supérieur à 7 mills le kWh représentent 6 pour cent de la vente totale d'électricité dans un régime reposant sur le gaz, le pétrole et le charbon; on peut de la même façon démontrer que ces possibilités s'élèveraient jusqu'à 8 pour cent dans un régime de production d'électricité fondé uniquement sur le charbon.

Résumé des hypothèses

L'objet des paragraphes ci-dessus, où l'on a examiné quelques-unes des hypothèses les plus importantes, était de mesurer les répercussions que des variations des valeurs admises peuvent avoir sur les conclusions et également d'indiquer dans une certaine mesure les limites de validité des études effectuées. Pour mener à bon terme les travaux qui ont abouti aux conclusions dont il s'agit, il a évidemment fallu recourir à des hypothèses bien plus nombreuses que celles citées. Nous espérons toutefois avoir pu donner une idée assez claire de l'importance que revêt l'élaboration d'un ensemble valable de prémisses si l'on désire que des études économiques du genre de celles dont traite cette communication aboutissent à des conclusions significatives. Nous croyons avoir choisi un ensemble judicieux d'hypothèses et avoir pu en tirer des conclusions valables.

LA MÉTHODE SUIVIE

Exposée très brièvement, la méthode employée pour étudier les possibilités économiques de l'énergie nucléaire a consisté : 1) en une analyse du marché national de l'énergie; 2) en une analyse des prévisions à long terme de la demande d'électricité; 3) en une analyse de l'offre; 4) en une synthèse des éléments constituant l'offre et la demande, tels qu'ils résultent des prévisions à long terme.

Analyse du marché de l'énergie

L'analyse du marché de l'énergie a comporté des études concernant par exemple : 1) l'accroissement dans le passé de la consommation d'énergie aux États-Unis d'Amérique; 2) les modifications de structure de la consommation d'énergie; 3) les investissements dans le système de production d'énergie; 4) les prévisions à long terme de la demande d'énergie; 5) les réserves d'énergie; 6) le rôle de l'énergie d'origine nucléaire. Parmi les conclusions obtenues, on doit citer les suivantes :

a) Le « besoin » d'une nouvelle source d'énergie aux États-Unis d'Amérique ne peut être démontré en se fondant sur d'éventuelles augmentations importantes du prix des combustibles classiques avant 1975.

b) C'est la production d'énergie électrique, en tant qu'elle exige des sources de chaleur d'assez grande puissance, qui constitue le marché le plus vaste pour l'énergie nucléaire aux États-Unis.

c) Si l'énergie d'origine nucléaire doit affronter, sur le marché de l'énergie électrique, la concurrence du charbon, elle devra le faire dans l'hypothèse où le prix du charbon restera pratiquement constant. En d'autres termes, la position concurrentielle de l'énergie d'origine nucléaire est telle qu'il faudra abaisser son prix de revient pour qu'il vienne à la rencontre de celui du charbon; on ne peut en effet s'attendre à une hausse importante de ce dernier au cours des prochaines décennies.

Analyse des prévisions à long terme de la demande d'énergie électrique

Nous avons porté ensuite notre attention, dans le cadre du marché de l'énergie aux États-Unis, sur le secteur de la production d'électricité. Les tendances antérieures ont été calculées, analysées et décrites dans leurs éléments caractéristiques les plus importants. Nous avons passé en revue les perspectives d'avenir de l'industrie électrique et, afin de délimiter avec précision le marché sur lequel l'énergie d'origine nucléaire tentera d'entrer en concurrence, ainsi que l'ampleur de ce marché, on a procédé a un découpage géographique des prévisions de la demande.

Analyse de l'offre

Après avoir étudié les prévisions de la demande d'énergie électrique (consommation future escomptée), nous avons procédé à une analyse approfondie des moyens qui permettront de satisfaire à cette demande future. Cette denière analyse a comporté des études de détail sur les prévisions concernant la construction de centrales hydrauliques, de centrales thermiques et de centrales diesel et le prix de revient de l'énergie électrique produite dans ces centrales.

La production hydroélectrique

Afin d'obtenir un inventaire de la puissance hydraulique aménagée ou à aménager, nous avons étudié toutes les installations réalisées jusqu'en 1953 et nous avons fait une analyse de toutes les régions de production hydroélectrique et de tous les bassins hydrographiques des États-Unis d'Amérique. De même, afin d'établir une prévision de l'accroissement de la capacité hydroélectrique pour les vingt années à venir, nous avons étudié, à des intervalles de cinq ans, pour la période comprise entre 1955 et 1975, les plans d'extension tant à l'échelon local que

régional des principales sociétés de production et de distribution des États-Unis d'Amérique. En rapportant les possibilités d'extension des divers bassins à la capacité déjà aménagée, nous avons pu évaluer, pour chacune des régions des États-Unis, les coûts de production futurs de l'énergie électrique d'origine hydraulique en fonction du temps.

La production d'électricité par les moteurs à combustion interne

Bien que, mesurée en kilowattheures, la part des moteurs à combustion interne dans le marché de l'énergie électrique ait été faible jusqu'ici et doive continuer de l'être, cette part est grande et même prédominante si l'on concentre son attention sur les tranches d'énergie à prix de revient élevé. Nous avons largement utilisé, pour les prévisions de la production d'énergie électrique dans des centrales diesel, les données et les études du marché relatives à la consommation rurale faites par la REA (Rural Electrification Authority). Les prix de revient de l'énergie électrique ainsi produite ont été calculés d'après des études consacrées à des centrales équipées de moteurs à combustion interne, situées dans toutes les régions géographiques des États-Unis d'Amérique.

La production des centrales thermiques à vapeur

Nous avons évalué le volume de la production future d'électricité dans les centrales thermiques à vapeur, aux États-Unis, en retranchant de la demande totale prévue, pour chaque année et pour chaque région, la production escomptée des centrales hydrauliques ainsi que des centrales à moteurs à combustion interne. Les prix de revient de l'énergie produite dans les centrales thermiques à vapeur ont été évalués sur la base d'une étude détaillée de 131 centrales de ce type construites entre 1946 et 1953 dans toutes les régions des États-Unis d'Amérique. En fait, nous avons étudié les caractéristiques de toutes les centrales thermiques à vapeur construites aux États-Unis d'Amérique dans la période d'après guerre. Les prix de revient ainsi obtenus ont été corrigés afin de tenir compte de divers facteurs tels que 1) la grandeur des centrales, 2) les divers aspects de leur exploitation, 3) l'extension de leur puissance, 4) le rythme de désaffectation, 5) la capacité de production existante et 6) le régime de propriété. Nous sommes partis de l'hypothèse que les frais d'exploitation encourus en 1953 dans les centrales à vapeur construites au cours de la période 1946-1953 sont bien représentatifs de ceux auxquels devront faire face les nouvelles centrales thermiques à vapeur pendant la période de 1955 à 1975.

Synthèse de l'offre et de la demande

Après avoir déterminé la production et la consommation d'électricité escomptées pour chaque région, nous avons établi la corrélation entre les quantités d'énergie électrique totales de chaque région et la répartition des prix de revient caractéristiques dans chacune d'elles à un moment donné. C'est ainsi que nous avons calculé les possibilités instantanées qui s'offriront à l'énergie d'origine nucléaire à une certaine époque, par exemple en 1960. Nous avons répété ce calcul pour 1965, 1970 et 1975.

Nous nous sommes servi ensuite de ces possibilités instantanées pour en déduire les possibilités cumulées de l'énergie d'origine nucléaire, ainsi que les courbes représentant le développement maximum probable d'une industrie de l'énergie nucléaire.

RÉSUMÉ DES RÉSULTATS OBTENUS

Nous avons brièvement décrit, dans le présent document, une méthode générale d'analyse économique et nous avons présenté une monographie à titre d'exemple d'application. Dans la présente section, nous allons résumer à la fois la méthode d'analyse et les résultats de l'étude monographique.

En ce qui concerne la méthode, nous avons montré que, pour établir les possibilités économiques de l'énergie d'origine nucléaire dans un pays donné, il faut d'abord analyser les utilisations présentes et futures de l'énergie sous ses diverses formes. Si l'analyse indique, par exemple, que la production d'énergie électrique constitue l'application la plus probable de l'énergie nucléaire dans ses débuts, il convient alors d'étudier les facteurs qui affectent l'offre et la demande d'électricité. Dans ce document, les États-Unis d'Amérique ont été divisés, pour les besoins de l'analyse, en plusieurs régions (et bassins hydrographiques), et nous avons établi des prévisions à long terme de la demande régionale d'énergie électrique et des moyens capables de satisfaire à cette demande. Nous avons établi, pour chaque région, la corrélation entre l'offre et la demande d'énergie électrique d'une part et le coût futur de la production d'électricité d'autre part; nous avons pu formuler de la sorte, sur les possibilités économiques de l'énergie d'origine nucléaire au sein de l'industrie de l'électricité aux États-Unis d'Amérique, un jugement valable pour l'ensemble du pays. Enfin, nous avons dû procéder à une analyse plus poussée des possibilités économiques afin de pouvoir donner une description précise et détaillée de l'ampleur et de la nature du marché qui s'offre à l'énergie d'origine nucléaire.

Selon les résultats de la monographie contenue dans le présent document, les possibilités qui s'offrent à l'énergie d'origine nucléaire aux États-Unis d'Amérique sont très faibles si le prix de revient de l'électricité d'origine nucléaire dépasse 10 mills le kWh; elles sont limitées (20 milliards de kWh en 1960) si ce prix s'établit aux environs de 9 mills le kWh, mais elles augmentent de façon spectaculaire si le prix de revient aux barres de distribution s'établit au-dessous de 7 mills le kWh. La nature de la concurrence se modifie en même temps que celle-ci porte sur des secteurs du marché auxquels sont attachés des prix différents. Dans les secteurs à

prix de revient élevé, on trouve surtout de petites centrales à moteurs à combustion interne; le secteur correspondant à un prix de revient de 5 à 7 mills est principalement celui des centrales thermiques à vapeur, tandis que les centrales hydrauliques prennent une très grande importance au niveau de 4 à 5 mills. D'une façon générale, on doit s'attendre à trouver des prix de revient plus élevés et des centrales plus grandes à l'est qu'à l'ouest du Mississipi; les plus grandes possibilités économiques se trouvent donc dans la moitié orientale des États-Unis d'Amérique. Ces résultats généraux ont tous été exposés en termes quantitatifs dans le chapitre intitulé « Conclusions ».

RECOMMANDATIONS POUR LES ÉTUDES ULTÉRIEURES

Le développement organisé d'une industrie ou la mise en valeur d'une région exige que les recherches physico-chimiques et économiques se complètent mutuellement. Au premier stade, il convient toutefois de mettre l'accent sur les recherches économiques; celles-ci doivent fournir les directives en vue des travaux physico-chimiques qui passeront ensuite au premier plan. Les études économiques du genre de celles auxquelles nous nous sommes référés dans la présente communication doivent permettre de désigner les régions qui offrent les plus grandes possibilités de développement. Des études purement scientifiques qui ne reposent sur aucune perspective commerciale n'offrent qu'un intérêt économique restreint.

Il semble que les études économiques du genre de celles que l'on vient d'exposer doivent intéresser les gouvernements, les industries dans leur ensemble et les entreprises considérées isolément. Elles permettent, en tout cas, une mise en garde contre une mauvaise distribution des ressources. D'un point de vue gouvernemental, les directives économiques ne doivent provoquer un afflux de capitaux vers l'exploitation de l'énergie nucléaire que si d'autres possibilités ne semblent pas offrir un meilleur rendement. Du point de vue d'une industrie, ces études économiques doivent permettre d'indiquer les applications de l'énergie nucléaire qui offrent les plus grandes possibilités, ainsi que le sens dans lequel il convient d'orienter les études et les recherches. Ici, en effet, une mauvaise distribution des ressources pourrait mener à la faillite.

Nous espérons que les études esquissées dans le présent mémoire inciteront d'autres chercheurs à étudier les aspects économiques de l'énergie d'origine nucléaire avant que leur pays ou leur organisation ne s'engagent dans de vastes programmes de recherches physico-chimiques, coûteux et démesurés. Enfin, nous souhaitons que ces études économiques puissent être utiles à d'autres chercheurs, dans la mesure où elles pourront leur fournir un cadre d'études, un mode d'analyse et une méthode systématique de traitement des données qui puissent s'adapter aux besoins d'autres pays, d'autres industries ou d'autres entreprises.

BIBLIOGRAPHIE

1. Ayers E. et Scarlott C. A., *Energy Sources—The Wealth of the World*, McGraw-Hill Co., 1952, Inc., New York.
2. Putnam Palmer, *Energy for the Future*, 1953, D. Van Nostrand et Co., New York.
3. U. S. Presidents Materials Policy Commission (PMPC), *Resources for Freedom*, 1952, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C.
4. Anon., *Electrical Industry Forecast for 1954-1963*, Electrical World, 21 septembre 1953, *140*, 131.
5. Barnett H. J., *Atomic Energy in the United States Economy*, Thèse, Université de Harvard, 1952, Cambridge, Mass.
6. Dewhurst F. J., *America's Needs and Resources*, the Twentieth Centura Fund, 1947, New York.
7. Office of Defense Mobilization, *Projections of Loads by FPC Regions, Class I Utility Systems*, 15 sept. 1953.

Contribution de l'énergie d'origine nucléaire aux ressources énergétiques du Royaume-Uni et du monde jusqu'en 1975

par Sir John Cockcroft

La technique nucléaire a maintenant atteint en Grande-Bretagne un développement tel qu'il est devenu possible de l'appliquer à la production industrielle de l'énergie électrique; c'est pourquoi le Gouvernement britannique a décidé de lancer un programme initial de construction de centrales nucléaires, d'une durée de dix ans. La nécessité de ce programme résulte de la croissance rapide de nos besoins d'énergie et de la difficulté toujours plus grande d'intensifier la production de charbon. L'Industrial Group de l'Atomic Energy Authority fait actuellement construire dans le Cumberland la première centrale nucléaire. Sir Christopher Hinton en donne une description dans l'une des séances de cette Conférence. La centrale nucléaire recevra sa chaleur de deux piles à ralentisseur en graphite, et cette chaleur sera transmise à des génératrices à vapeur au moyen de gaz carbonique sous pression. Nous espérons que cette centrale fournira plus de 50 mégawatts au réseau électrique national. Il est prévu de construire trois autres centrales de mêmes caractéristiques.

On peut accroître la puissance et le rendement des centrales nucléaires à piles à ralentisseurs en graphite en augmentant leurs dimensions ainsi que la pression des gaz et la température des cartouches de combustible, et en améliorant les caractéristiques du système de transfert de chaleur. Des entreprises industrielles mettent actuellement au point, avec le concours technique de l'Atomic Energy Authority, les projets de ces centrales perfectionnées. La British Central Electricity Authority se propose de construire douze de ces centrales qui entreront successivement en service entre 1960 et 1965. On compte que la puissance de chacune d'elles sera portée, par étapes, d'un peu plus de 100 mégawatts au début jusqu'à 200 mégawatts environ. La puissance totale installée devrait donc approcher de 2 000 mégawatts vers 1965, époque à laquelle l'énergie nucléaire donnera des résultats équivalents à la combustion de presque 5 millions de tonnes de charbon par an.

Après 1965, comme l'industrie d'une part et les services électriques, d'autre part, auront acquis respectivement de l'expérience en matière de construction et d'exploitation de centrales nucléaires, on espère que le programme de construction de ces centrales se poursuivra encore plus rapidement, de telle façon que, vers 1970, la plupart des nouvelles centrales britanniques soient du type nucléaire. Vers 1975, la puissance installée atteindra vraisemblablement 10 000 à 15 000 mégawatts tandis que celle du réseau national d'électricité sera au total de 55 000 à 60 000 mégawatts. Les centrales nucléaires seront probablement exploitées comme centrales de base et fourniront ainsi, par rapport à leur puissance, plus d'énergie que les centrales thermiques classiques. Aussi estime-t-on que, vers 1975, l'énergie d'origine nucléaire devrait fournir l'équivalent de 40 millions de tonnes de charbon par an environ, soit à peu près 40 pour cent de l'énergie nécessaire à la production de l'électricité.

On peut avoir une idée approximative des besoins du Royaume-Uni en énergie électrique vers l'an 2000 en extrapolant les courbes de la demande, courbes présentées par M. Daniel dans d'autres mémoires de cette Conférence. On prévoit que l'énergie dont on aura besoin pour la production d'électricité représentera environ l'équivalent de 250 millions de tonnes de charbon. Il est probable que toute énergie nécessaire au-delà des besoins de 1975 devra être d'origine nucléaire. On peut donc s'attendre à ce que l'énergie nucléaire utilisée vers l'an 2000 dans le Royaume-Uni soit équivalente à plus de 200 millions de tonnes de charbon par an.

Nous pouvons comparer ces données avec les besoins mondiaux en nous reportant à la communication présentée à cette Conférence par MM. Robinson et Daniel *. Les auteurs prévoient qu'en l'an 2000 les besoins mondiaux en électricité seront de 9 000 milliards d'unités (9×10^{12}), ce qui reviendrait à consommer chaque année l'équivalent de 3,5 milliards de tonnes de charbon si toute cette énergie devait être produite uniquement dans des centrales thermiques. MM. Robinson et Daniel estiment que la demande totale de combustibles primaires ne sera pas inférieure à l'équivalent de

---

Original : anglais.

* Voir dans le présent volume le mémoire P/757, séance 2.

7,5 milliards de tonnes de charbon par an; puis, après avoir comparé ces données avec l'évaluation des ressources de combustibles classiques (y compris les ressources d'énergie hydraulique), ils sont amenés à se demander s'il sera possible de satisfaire la majeure partie de la demande d'électricité — mettons l'équivalent de 2 ou 3 milliards de tonnes de charbon par an — en ayant recours à l'énergie nucléaire.

La quantité de combustible nucléaire qui sera nécessaire à ces fins dépend du rendement de l'énergie dégagée par la fission de l'uranium. Si l'on peut finalement obtenir un rendement de 33 pour cent, une tonne d'uranium donnera les mêmes résultats qu'un million de tonnes de charbon. Nous espérons que l'on pourra parvenir à ce rendement élevé en améliorant progressivement la conception des centrales nucléaires.

Les piles à ralentisseur en graphite avec lesquelles le Royaume-Uni envisage d'entreprendre la production d'énergie nucléaire ont le grand avantage qu'elles permettent d'utiliser de l'uranium naturel comme combustible, sans qu'on doivent recourir à l'uranium enrichi provenant d'une usine de diffusion. Avec ces piles nous pensons obtenir, au cours d'un seul cycle de combustible, l'équivalent calorifique de 10 000 tonnes de charbon anglais de qualité moyenne. On pense que la limite de production thermique sera déterminée par la détérioration des cartouches de combustible plutôt que par des facteurs d'origine nucléaire.

A la fin du premier cycle, les combustibles renferment une assez grande quantité de plutonium ainsi que des produits de fission; ces derniers seront extraits par des procédés chimiques et l'uranium et le plutonium pourront ensuite être réemployés. Une autre solution consisterait à employer le plutonium pour alimenter d'autres types de piles thermiques, telles que des piles à ralentisseur à l'eau ou des piles au sodium-graphite qui exigent l'utilisation d'un combustible enrichi, ou encore des piles autorégénératrices à neutrons rapides productrices d'énergie.

Dans un mémoire relatif aux cycles de combustion*, M. Dunworth montrera qu'il devrait être possible de recycler plusieurs fois un combustible comprenant de l'uranium et du plutonium jusqu'à ce que la concentration en uranium-235 tombe à une faible valeur et qu'une quantité appréciable d'uranium-238 ait été soumise à la fission. De cette façon, on parviendra peut-être à porter le rendement calorifique d'une tonne d'uranium de l'équivalent de 10 000 tonnes de charbon à celui d'au moins 100 000 tonnes de ce combustible. Cette prévision coïncide avec celles que font MM. Davis et Lewis, dans le mémoire P/11 (Séance 5, dans le présent volume).

Pendant cette période et même auparavant, le type de pile utilisé en Grande Bretagne sera probablement remplacé par une pile dont la puissance et le rendement seront plus élevés. On peut attendre beaucoup du remplacement éventuel des piles à ralentisseur en graphite et refroidissement au gaz par des piles au sodium-graphite et ralentisseur à l'eau actuellement à l'étude au Royaume-Uni. La production d'énergie augmentera probablement au point que les dépenses tomberont au-dessous de 90 livres par kilowatt installé.

On peut de plus espérer que les conditions d'utilisation de l'uranium seront encore améliorées lorsqu'on utilisera sur une grande échelle les piles autorégénératrices à neutrons rapides. Dans une communication qui sera présentée ultérieurement à cette Conférence, M. Shepherd exposera les résultats obtenus à Harwell avec la pile Zéphyr, pile à neutrons rapides d'énergie zéro, et il montrera que les piles à neutrons rapides au plutonium doivent avoir un *facteur de gain* très élevé. Cela signifie que le plutonium secondaire engendré dans la pile à partir de l'uranium-238 devrait être produit en quantité nettement supérieure à celle du plutonium soumis à la fission dans le noyau. Nous devrions donc pouvoir tirer parti de la plus grande partie de l'énergie de fission de l'uranium-238 aussi bien que de l'uranium-235, et extraire d'une tonne d'uranium au moins l'équivalent calorifique des millions de tonnes de charbon que j'ai mentionnés plus haut. Les piles autorégénératrices à neutrons rapides ont donc un rôle important à jouer dans les programmes *à long terme* de production d'énergie nucléaire; MM. Kendall et Fry exposent dans le mémoire P/405 (séance 12 A, volume III) les problèmes techniques délicats que pose la pile autorégénératrice à neutrons rapides que nous sommes en train de construire en Grande-Bretagne et qui doit nous permettre de faire des expériences sur une vaste échelle.

Le programme de production d'énergie nucléaire présente donc cette caractéristique importante qu'au fur et à mesure de sa mise en œuvre, on peut espérer que le coefficient d'utilisation de l'uranium s'améliorera dans la proportion de un à vingt. Les progrès techniques se produiront donc probablement à un rythme plus rapide que l'accroissement des besoins en énergie nucléaire.

Nous pouvons donc envisager que les besoins du Royaume-Uni en énergie électronucléaire pour 1975 seront satisfaits par une consommation annuelle d'uranium ne dépassant pas 400 tonnes; d'autre part, la charge initiale des nouvelles centrales pourrait approcher de 4 000 tonnes par an.

Quant aux besoins éventuels du Royaume-Uni en l'an 2000, besoins qui équivaudront à 250 millions de tonnes de charbon par an, il sera possible de les satisfaire par la consommation annuelle de 250 tonnes d'uranium ou de thorium si, à cette époque, les méthodes de régénération sont complètement mises au point. A la même époque, il serait possible de suppléer à la pénurie naissante des ressources mondiales en combustibles classiques,

* Voir le mémoire P/403, Actes de la Conférence, vol. III, séance 10 A.

dont ont parlé MM. Robinson et Daniel, en produisant la majeure partie de l'énergie électrique mondiale dans des centrales nucléaires qui consommeraient chaque année 2 000 ou 3 000 tonnes d'uranium ou de thorium. D'importantes quantités d'uranium destinées au premier chargement des nouvelles piles seraient en outre nécessaires. Il semble toutefois ressortir des mémoires présentés à cette Conférence au sujet des ressources en uranium qu'il ne saurait y avoir grande difficulté à satisfaire à cette demande.

Le programme que je viens d'exposer demande pas mal de travaux techniques de mise au point et maints problèmes restent encore à résoudre. Nous pensons toutefois qu'en poursuivant nos travaux, il nous sera possible de leur apporter une solution.

Nous entendons que notre programme soit très souple et nous le modifierons certainement à la lumière de l'expérience que nous acquerrons avec le temps. Il sera probablement très différent en 1965 de ce qu'il est à l'heure actuelle.

L'énergie nucléaire et l'Afrique du Sud

par B. F. J. Schonland *

L'oxyde d'uranium a été découvert dans les mines d'or du Witwatersrand il y a trente-deux ans. La petite quantité d'oxyde d'uranium contenue dans les concentrés d'or n'offrait aucun intérêt pour l'extraction du radium, seul élément associé à l'uranium qui eût à l'époque une certaine valeur marchande. Maintenant, l'élément initial se vend lui-même à un prix élevé en raison de ses qualités intrinsèques et les mines du Rand et de l'État libre d'Orange sont en voie de produire annuellement une quantité d'oxyde d'uranium de haute concentration, estimée à plusieurs milliers de tonnes et dont on peut dire que la valeur dépassera 40 millions de livres sterling. On a annoncé que l'Union Sud-Africaine est un des plus grands producteurs d'uranium du monde.

L'uranium est étroitement associé à l'or et on a constaté que sa concentration est relativement faible. On le produit à partir de schlamms résiduels dont on a extrait, par le traitement habituel, l'or et l'argent qu'ils contiennent. L'uranium et l'or se trouvent dans les mêmes minerais, les traitements préliminaires sont identiques et il n'est pas nécessaire de prendre des dispositions supplémentaires en ce qui concerne le concassage et le broyage.

« On constate encore, comme le remarque A. G. Thomson dans un article paru dans le *Mining Journal* (22 mai 1953), que, par un heureux hasard, une solution cyanurée ne dissout pas l'uranium du minerai, mais que cet uranium est retenu dans les résidus provenant de l'extraction de l'or. Normalement, le tourteau, considéré comme déchet, est envoyé dans les bassins de schlamms, mais, dans les mines produisant de l'uranium, ce même tourteau deviendra au contraire la matière première qu'utilisera une seconde installation de récupération, construite en tant qu'unité complètement indépendante. Dans l'installation pour le traitement de l'uranium, on réduit le tourteau en une sorte de schlamm en le mélangeant avec de l'eau. Ce schlamm est ensuite versé dans des bassins contenant de l'acide sulfurique dilué qui dissout l'uranium. » La solution (après élimination par filtrage des déchets solides résiduels) est purifiée par des procédés chimiques et l'oxyde d'uranium est précipité. « Le précipité, poursuit le même auteur, qui se présente sous la forme d'une boue jaune, est envoyé dans un calcinateur central où il est transformé en oxyde d'uranium déshydraté. Ce produit doit être encore purifié avant d'être utilisé pour la production de l'énergie atomique et, à cet effet, il est raffiné en Grande-Bretagne et aux États-Unis. » Ainsi, le coût de l'extraction est limité au traitement du tourteau provenant de la cyanuration. Dans certaines mines, les vieux crassiers de schlamms abandonnés seront traités dans les usines d'uranium.

Jusqu'ici, 26 mines environ ont reçu l'autorisation de produire de l'uranium et leur nombre sera probablement augmenté. En vertu de la loi de 1948, l'uranium devient propriété de l'État dès sa production.

Afin de couvrir le programme actuel, un contrat a été conclu entre le Comité de l'énergie atomique de l'Union Sud-Africaine et les services compétents des Gouvernements du Royaume-Uni et des États-Unis d'Amérique. Les contrats passés avec les compagnies minières ont une validité de 10 ans, à dater du moment où chaque installation minière sera en pleine production. Les travaux d'exploitation sont exécutés de manière à laisser une marge de bénéfice satisfaisante. Les fonds d'investissement nécessaires pour la construction des usines sont avancés par la Grande-Bretagne et les États-Unis sous forme de prêts aux compagnies minières; il n'est pas demandé aux actionnaires d'y participer. Le prix de l'uranium est calculé de manière telle qu'à la fin de la période de 10 ans les installations auront été payées par le produit des ventes et deviendront la propriété des mines en question. Le capital investi dans les installations existantes ou en cours de construction est d'environ 40 millions de livres.

La simple exposition de ces faits montre l'ampleur étonnante de cette entreprise et l'extrême importance que lui accordent l'Union Sud-Africaine et le Commonwealth. Le Général Smuts a, en premier lieu, demandé en février 1946 à l'auteur de la présente communication de constituer un comité pour examiner soigneusement, avec la participation de l'industrie minière, les possibilités d'extraction de l'uranium dans le Witwatersrand. Les ressources scientifiques, techniques et industrielles du pays étaient telles qu'en octobre 1954 le montant mensuel des exportations d'uranium et de thorium de l'Union Sud-Africaine dépassait 2 millions de livres, alors que la moitié seulement des mines prévues participait à la production.

L'Union Sud-Africaine attache une grande importance à cette rapide réalisation technique. Un certain nombre de filons, dont la teneur en or était

---

Original : anglais.

* Atomic Energy Research Establishment, Harwell, Berkshire.

insuffisante pour justifier l'extraction et le concassage en vue d'obtenir uniquement de l'or, sont désormais exploités pour la production de l'or et de l'uranium, et plusieurs mines dont l'exploitation était sur le point d'être abandonnée ont repris une nouvelle activité pour une durée indéterminée.

On a pu faire face à l'importante augmentation de la consommation d'acide sulfurique par l'utilisation de minerais sulfureux que l'on a trouvés concassés avec l'or et l'uranium. Cinq usines, dont la production totale dépasse mille tonnes d'acide sulfurique par jour, ont été installées, ce qui constitue un apport considérable à la production dans l'Union de ce produit chimique essentiel. Après la période décennale mentionnée ci-dessus, l'Union Sud-Africaine devrait être en mesure de vendre l'uranium à un prix qui lui permettrait de réaliser un bénéfice intéressant.

Il est de plus en plus évident que le marché de l'uranium en tant que combustible destiné aux centrales électronucléaires sera considérable pendant de nombreuses années à venir. Jesse Johnson, de la Division des matières premières de la Commission de l'énergie atomique des États-Unis, a estimé qu'aux environs de 1970 la charge initiale en combustible des nouvelles centrales électronucléaires, ainsi que l'approvisionnement des centrales existantes, représentera une demande mondiale de 17 000 tonnes d'uranium par an. Cette estimation a été faite quelque temps avant que ne soient rendus publics, dans le *Livre blanc* britannique, les résultats d'une enquête sur les possibilités de l'énergie nucléaire; elle est vraisemblablement au-dessous de la réalité. Johnson a également évalué que le prix mondial vers 1970 sera voisin de 70 shillings (10 dollars) par livre de concentré. Ainsi, pour les quelques années à venir, la production sud-africaine d'uranium devrait être assurée d'un débouché immédiat et intéressant même si elle dépassait considérablement le but assigné et même si de nouvelles sources étaient exploitées en Afrique et ailleurs.

A cette période succédera sans doute une période plus difficile, lorsque les combustibles nucléaires produits artificiellement — le plutonium et l'uranium-233 (produits respectivement à partir de l'uranium-238 et du thorium dans les convertisseurs et les piles régénératrices) — concurrenceront les combustibles nucléaires naturels. La demande mondiale en uranium naturel pourrait alors être plus réduite et la production pourrait dépasser la demande. Mais cette situation ne se présentera pas avant 25 ans au moins et personne ne peut prédire si longtemps à l'avance avec quelque certitude quels seront, alors, les besoins en énergie nucléaire. Avant cela, l'uranium de l'Union Sud-Africaine sera utilisé pour développer de nouvelles ressources en énergie, aussi bien pour l'Union elle-même que pour ses voisins, dans toute l'Afrique du Sud.

Du fait de ses abondantes ressources en charbon de qualité à bon marché, groupées dans les régions du Transvaal et du Natal, l'Union Sud-Africaine ne sera vraisemblablement pas, dans l'immédiat, un gros consommateur d'énergie nucléaire et cela en dépit de sa situation privilégiée comme producteur d'uranium. Mais les gisements de charbon précités sont très localisés, et les centres industriels les plus éloignés, tels que Le Cap et Port-Elizabeth, dépendent pour leur approvisionnement en charbon d'un transport par rail de plus d'un millier de milles (environ 1 600 km). Ce transport augmente dans une large proportion le coût de l'énergie électrique dans ces villes, et rend également difficile leur développement industriel dans l'avenir, en dépit de conditions locales particulièrement favorables et des possibilités de trouver de la main-d'œuvre sur place. Dans dix ans, Le Cap, Port-Elizabeth et East London (ces deux dernières villes sont à proximité de la grande source de main-d'œuvre constituée par les réserves indigènes du Ciskei et du Transkei) pourraient bien faire appel aux centrales électronucléaires.

Deux autres régions de l'Union qui sont encore plus mal placées du point de vue de l'approvisionnement en charbon, pourraient utiliser une quantité d'énergie appréciable. La première est la région très riche en minerai de la province de N. W. Cape et du Namaqualand, la seconde est celle du territoire de l'Afrique du Sud-Ouest; ces deux régions sont desservies par un réseau ferroviaire peu développé. Outre ses mines de cuivre, de plomb et de manganèse qui pourraient consommer une quantité d'énergie considérable, le territoire de l'Afrique du Sud-Ouest possède une importante industrie de conserves de poisson dont l'expansion, comme celle de l'industrie du même type des régions côtières de la province de N. W. Cape, est entravée par le coût élevé de l'eau à usage industriel qui doit en majeure partie être procurée par évaporation de l'eau de mer. De récents progrès réalisés dans la technique de déminéralisation de l'eau permettent d'espérer que l'énergie nucléaire pourra un jour être appliquée à la production, à un prix raisonnable, de grandes quantités d'eau douce en provenance de la mer.

La Fédération de Rhodésie et de Nyassaland, située au Nord, se trouve, du point de vue de l'énergie, dans la même situation que l'Union. La principale région houillère de la Fédération Wankie, au Nord de Bulawayo, doit desservir un vaste territoire dont le réseau ferroviaire est insuffisant pour le transport du charbon sur une grande échelle.

On a estimé (*Mining Journal*, Annual Review, 1954) que, vers 1962, les Rhodésies auront besoin de 4 millions de tonnes de charbon pour la seule production de l'énergie électrique. Ce chiffre est de 33 pour cent supérieur à la production actuelle des mines de charbon et n'est guère inférieur à la production totale prévue pour 1962. En admettant qu'on puisse faire face aux besoins en charbon du Copperbelt, le transport par rail de ce combustible constituerait un fardeau impossible à supporter par un réseau ferroviaire inadéquat. Pour cette raison, la Fédération active la réalisation du projet

d'aménagement hydroélectrique des Gorges de Kariba et prévoit par la suite l'aménagement de la rivière Kafue.

Ces travaux pour la mise en valeur des Rhodésies, et du Copperbelt en particulier, ne satisferont probablement qu'une partie des besoins de ces régions dont l'économie fait de rapides progrès. La valeur de la production minière des Rhodésies atteignait, en 1950, 62 millions de livres et avait presque doublé en 1953 (114 millions de livres). Ces chiffres seront considérablement augmentés au cours des deux années à venir grâce aux nouvelles exploitations.

M. J. Bronowski (*Optima*, décembre 1954) a estimé qu'avant 1965 les progrès de l'industrie minière dans les Rhodésies requerront 4 000 millions de kWh par an et que vers 1970 la demande pourra avoir doublé. Les gisements cuprifères sont situés entre 400 et 500 milles (650 à 800 km) au nord de Wankie et seront distants de 250 à 300 milles (400 à 480 km) des installations hydroélectriques qui seront effectuées dans les Gorges de Kariba; le transport de l'énergie sur d'aussi longues distances en doublera le prix. Ainsi, vers les années 1970, on pourrait envisager l'installation, dans le Copperbelt même, de centrales électronucléaires d'importance considérable (pouvant produire un total de 1 000 MW).

Ce n'est pas seulement dans les régions minières de la Rhodésie du Nord que l'énergie nucléaire peut jouer un rôle dans le développement de l'économie à venir. On rencontre partout en Afrique des gisements minéraux qui seraient exploitables si de l'énergie, obtenue à prix raisonnable sinon bon marché, pouvait être produite sur place et surtout si l'équipement générateur était facilement transportable. Il semble qu'il y aurait un débouché considérable en Afrique, et dans d'autres parties du monde, pour de telles centrales nucléaires d'importance moyenne.

D'après une récente déclaration, la Commission de l'énergie atomique des États-Unis d'Amérique estime qu'une bonne partie des débouchés de l'énergie nucléaire sur les marchés étrangers consiste en centrales d'une puissance électrique au plus égale à 30 MW, destinées à alimenter les exploitations minières et les installations industrielles éloignées des grands centres. M. Bronowski, dans l'article mentionné plus haut, insiste sur un nouveau point de vue : le fait de disposer de l'énergie sur place peut offrir un intérêt beaucoup plus grand que son utilisation limitée aux besoins généraux de la mine car il permettrait de produire, par des procédés électrolytiques et électrothermiques, des métaux d'un très grand degré de pureté, à la mine même. Si cette conception est juste, les capitaux ne seront probablement plus investis à l'avenir en Afrique dans la construction de réseaux ferroviaires coûteux, destinés à transporter le charbon vers les régions minières et industrielles et à évacuer d'énormes quantités de minerais ou de métaux incomplètement purifiés, mais bien plutôt dans la création de centrales électronucléaires grâce auxquelles on pourra considérablement réduire les transports de combustible vers les régions éloignées ainsi que le tonnage de produits minéraux exportés de ces régions.

On peut, peut-être, se laisser aller à imaginer d'autres possibilités offertes à l'énergie nucléaire en Afrique au sud du Sahara, car c'est une région destinée à un développement rapide et les vues fantaisistes d'aujourd'hui pourraient bien n'être que des prévisions à longue échéance. On a constaté en Union Sud-Africaine, pendant et depuis la dernière guerre, que les indigènes africains peuvent rapidement devenir d'excellents ouvriers. Grâce à l'énergie électrique fournie par le charbon du Transvaal du Sud et du Natal, l'Africain de couleur semi-spécialisé constitue l'ossature d'un groupe d'industries secondaires dont le développement a été tout à fait remarquable et où un grand nombre de blancs qualifiés ont également trouvé un emploi. Ainsi, ce qui a été le sérieux problème du paupérisme des blancs dans l'Union a maintenant disparu. On peut s'attendre à ce que le développement industriel de l'Union Sud-Africaine gagne vers le nord (comme cela commence à avoir lieu en Rhodésie du Sud et au Congo) à mesure que croîtront les disponibilités d'énergie au service des usines et des ateliers mettant en œuvre les ressources locales : minérales, forestières et agricoles. D'ici peu, les Rhodésies auront besoin d'une grande quantité d'énergie à bon marché pour la production d'engrais azotés. On a déjà commencé à développer les cultures alimentaires, et l'industrie du coton dans toutes ses branches est bien établie.

La dérivation d'eau des rivières et des étangs pour l'irrigation d'autres régions semi-désertiques deviendra possible grâce aux nouvelles perspectives qu'offre l'énergie atomique. En effet, il sera possible de fournir de l'énergie aux endroits éloignés voulus afin de pomper l'eau, de creuser des canaux et de percer des tunnels pour des adductions d'eau. Les régions semi-désertiques de Karroo, dans l'Union Sud-Africaine, pourraient de cette manière devenir un bassin bien irrigué si l'eau des marais de l'Okavango et du Nord Bechuanaland était détournée vers le sud par des canaux appropriés. Sur une plus petite échelle et avec moins de difficulté, l'eau de certaines rivières pourrait être déversée sur les terrains secs de leurs rives (ce qui a été réalisé avec succès, à petite échelle, sur le cours inférieur de l'Orange) ou être transportée par tunnels à travers les montagnes dans de nouvelles régions, comme on se propose de le faire dans le cours supérieur de la même rivière.

Voilà quelques exemples de ce que nous pourrons sans doute réaliser lorsque nous serons en mesure d'installer des centrales électriques dans des régions éloignées des ressources de charbon et de combustibles liquides. Leurs conséquences pour l'avenir de l'Afrique du Sud pourraient bien se révéler étonnantes.

Le rôle de l'énergie et celui de l'énergie nucléaire aux États-Unis

par Philip Sporn*

Nous nous proposons d'examiner dans le présent document le rôle de l'énergie, et en particulier de l'énergie atomique, dans l'économie des États-Unis. L'énergie joue actuellement un rôle différent dans chacune des diverses parties du monde, selon l'usage que l'on fait des machines pour suppléer à l'effort de l'homme. Indépendamment de la question de savoir si l'homme pourra en disposer, et à quel prix, l'énergie atomique affectera donc de façons différentes les pays et les régions du monde. Nous devrons donc nous livrer ici à certaines comparaisons entre les conditions qui prévalent dans les systèmes économiques industriels et non industriels autres que celui des États-Unis. Notre étude portera cependant surtout sur ce dernier pays.

Il est si facile de perdre la réalité de vue, qu'il est peut-être utile de répéter tout d'abord que l'énergie nucléaire peut être considérée comme un combustible qui se présente sous une nouvelle forme. C'est une source d'énergie de remplacement, aux possibilités fort attrayantes, qui pourra compléter les ressources du globe en chutes d'eau et en combustibles tels que le charbon, le pétrole et le gaz. Les attraits principaux de l'énergie nucléaire sont, en premier lieu, qu'il s'agit d'un combustible concentré, donc d'un transport moins coûteux; que ce combustible est, potentiellement, plus abondant que tous les autres réunis; enfin, qu'il deviendra peut-être un jour meilleur marché que les combustibles classiques. Là où ces derniers sont plus rares et d'un prix plus élevé qu'aux États-Unis, cette dernière éventualité est peut-être plus proche que dans mon pays. Le programme de recherche, d'application et de collaboration dans ce domaine, que les États-Unis ont mis à exécution avec les autres pays, devrait contribuer à la rapprocher encore.

S'il est vrai que l'énergie nucléaire est capable de produire du courant électrique à meilleur compte que les moyens classiques actuellement utilisés, elle permettra à l'homme de disposer en tout temps d'un courant à bon marché, en dépit de l'épuisement prévu des approvisionnements en combustibles ordinaires, et de la hausse des prix de ces combustibles qui devrait en résulter. Il y aura là un fait économique important. Mais on peut se demander si cette conséquence peut à elle seule avoir un effet révolutionnaire sur le niveau de vie, aux États-Unis ou dans d'autres pays. L'existence d'un combustible meilleur marché et plus facilement transporté ne peut suffire à relever le niveau du bien-être économique, ni à industrialiser des économies non industrielles. Une abondante production d'électricité est une nécessité pour une économie industrielle; lorsque cette production est assurée en tout temps, elle peut catalyser d'autres forces sans lesquelles l'industrialisation serait impossible. Toutefois, aucune société industrielle prospère ne peut subsister sans l'apport de ressources humaines et matérielles pleinement mises en valeur, dont l'électricité n'est qu'un élément. Nous essaierons dans le présent document de montrer, entre autres choses, la relation qui existe entre l'électricité et les autres éléments de base de l'économie américaine.

Je suis convaincu que l'énergie atomique peut avoir un avenir brillant et être d'une extrême importance pour le monde et pour les États-Unis. Ce sera une réussite considérable que d'arriver à perfectionner la production d'électricité de source nucléaire, et à lui assurer des approvisionnements abondants en combustibles à bas prix. C'est de cela que dépend son avenir. Avant d'en terminer avec mon exposé j'aurai à revenir sur les conséquences que cette réussite peut avoir pour les États-Unis et pour le reste du monde.

La seule perspective d'un tel succès suffit à encourager les hommes et les peuples, et à les inciter à ne rien négliger pour faire progresser une question dont la solution peut avoir des conséquences incalculables. Il y a là, toutefois, un impondérable que je laisserai de côté.

Mon objet est beaucoup plus terre à terre. Avant de pouvoir nous représenter les profits tangibles que nous espérons tirer de l'électricité de source nucléaire, il nous faut mesurer le rôle que le combustible et l'énergie jouent dans une économie. Pour importants qu'ils soient l'un et l'autre, ils ne jouent pas le rôle décisif qu'on leur attribue fréquemment. Je commencerai donc par définir les postes où le combustible et l'électricité interviennent, énumération fastidieuse sans doute, et j'essaierai d'évaluer leur place dans le processus

---

Original : anglais.

* Président de l'American Gas and Electric Company.

Tableau 1

Coûts de production de l'électricité dans une centrale moderne, selon diverses hypothèses [a] relatives au coût du combustible et aux particularités de la centrale

Nombre d'heures d'exploitation	Coût du combustible			Autres frais de production (mills)	Intérêt et amortissement par kWh (mills)	Coût total par kWh			Coût du combustible en pourcentage du coût total		
	30 cents par million de Btu (mills) [b]	20 cents par million de Btu (mills)	10 cents par million de Btu (mills)			30 cents par million de Btu (mills)	20 cents par million de Btu (mills)	10 cents par million de Btu (mills)	30 cents par million de Btu	20 cents par million de Btu	10 cents par million de Btu
8 500	2,7	1,8	0,9	0,4	2,03	5,13	4,23	3,33	53	43	27
7 500	2,7	1,8	0,9	0,4	2,30	5,40	4,50	3,60	50	40	25
6 000	2,7	1,8	0,9	0,5	2,87	6,07	5,17	4,27	44	35	21
5 000	2,7	1,8	0,9	0,5	3,45	6,65	5,75	4,85	41	31	19
4 380	2,7	1,8	0,9	0,6	3,93	7,23	6,33	5,43	37	33	17
3 500	2,7	1,8	0,9	0,7	4,92	8,32	7,42	6,52	36	28	14

[a] Dans l'hypothèse où le prix de revient de la centrale est de 130 dollars par kWh et où les frais annuels d'intérêt et d'amortissement sont de 13,25 pour cent, ou 17,23 dollars par kW. Taux calorifique : 9 000 Btu par kWh.

[b] Un mill = un millième de dollar des États-Unis.

dont ils sont un élément. Il sera ensuite possible de se faire une idée du rôle que jouera peut-être l'énergie atomique elle-même lorsque, sa technologie ayant été améliorée, elle pourra prendre la place qui lui revient parmi les divers combustibles qui constituent la réserve totale dont le monde peut disposer.

Je me propose essentiellement d'étudier le rôle économique de l'énergie électrique. Je commencerai donc par l'utilisation de l'énergie, autrement dit du combustible sous forme de courant électrique. D'une façon générale, le coût du combustible aux États-Unis n'est ni un élément primordial du coût total de production d'électricité, ni l'élément déterminant de l'utilisation de l'énergie électrique.

Examinons d'abord le coût du combustible tel qu'il ressort du tableau 1. Dans une centrale moderne, le coût du combustible représente au maximum 50 pour cent du prix de revient total du kWh aux barres collectrices, et un pourcentage aussi élevé ne se rencontre que dans le cas exceptionnel où la centrale fonctionne avec un taux d'utilisation de 100 pour cent, soit 8 760 heures par an. Pour le taux d'utilisation habituel de 50 pour cent environ, ou 4 400 heures par an, le combustible, même lorsqu'il est d'un prix d'achat élevé, de 30 cents le million de Btu par exemple, représente un pourcentage moindre du coût total de production du courant. Les coûts en capital, les frais d'entretien et autres frais d'exploitation, le combustible mis à part, jouent un rôle capital même dans la formation du prix de revient de l'électricité aux barres collectrices. L'importance de ce fait saute aux yeux lorsque l'on étudie l'influence de l'énergie nucléaire sur le prix de revient de l'énergie électrique.

Ainsi, dans le prix de revient total de l'électricité, le combustible ne représente qu'un élément parmi d'autres.

Or, lorsque nous examinons l'influence de ce prix du combustible sur l'utilisation de l'énergie, c'est-à-dire sur le désir des consommateurs d'en acquérir et sur leur possibilité de le faire, il devient difficile de découvrir un rapport bien marqué. Laissons de côté pour le moment ce groupe particulier d'industries pour lesquelles l'électricité est plus ou moins une matière première. Ce sont des industries importantes, et j'y reviendrai bientôt. Mais rares sont les économies, s'il en existe, où ces industries jouent un rôle déterminant dans l'établissement du niveau de vie.

D'une façon générale, il n'existe pas de corrélation bien nette d'une région à une autre entre les dépenses en combustibles par kWh produit et le nombre de kWh vendus par habitant. Le tableau 2 le montre bien. Ainsi, dans la région centre nord-est des États-Unis, le coût du combustible est légèrement supérieur à la moyenne du pays, alors que le chiffre des ventes par habitant est supérieur à la moyenne pour l'ensemble du pays. Dans les états du centre nord-ouest, où ce coût est légèrement inférieur à la moyenne du pays, le chiffre des ventes par habitant est très inférieur à la moyenne pour l'ensemble du pays. Dans la région centre sud-ouest, bien que le coût des combustibles soit inférieur de presque les deux tiers à la moyenne nationale, le chiffre des ventes par habitant ne dépasse que faiblement cette moyenne.

Une comparaison portant sur le pourcentage de population et le pourcentage des ventes de kWh ne fait apparaître que peu de différence dans la

Tableau

Production d'électricité par l'ensemble des centrales alimentant les réseaux

Région [a]	Coût moyen total du combustible par million de Btu (cents)	Nombre de kWh vendus par habitant	Pourcentage des ventes de kWh	Pourcentage de la population	Rapport du pourcentage des ventes de kWh au pourcentage de la population
États-Unis	25,2	2 462	100,0	100,0	1 000
Nouvelle-Angleterre	35,5	1 822	4,5	6,1	738
Centre-Atlantique	30,1	2 367	19,0	19,8	960
Centre nord-est	25,6	2 633	21,8	20,4	1 069
Centre nord-ouest	24,9	1 720	6,4	9,2	696
Sud-Atlantique	27,3	2 117	12,1	14,0	864
Centre sud-est	18,9	3 507	10,4	7,3	1 425
Centre sud-ouest	9,6	2 667	7,6	9,6	792
Montagnes	20,3	2 662	3,8	3,5	1 086
Pacifique	25,9	3 511	14,4	10,1	1 426

Source : Edison Electric Institute Statistical Department.

[a] Les régions comprennent les États ci-après :
Nouvelle-Angleterre : Maine, New Hampshire, Vermont, Massachusets, Rhode Island, Connecticut;
Centre-Atlantique : New York, New Jersey, Pennsylvanie;
Centre nord-est : Ohio, Indiana, Illinois, Michigan, Wisconsin;
Centre nord-ouest : Minnesota, Iowa, Missouri, North Dakota, South Dakota, Nebraska, Kansas;

Tableau

Revenu par habitant, production et consommation

Pays	Revenu par habitant (en dollars)	Consommation d'énergie par habitant en tonnes métriques d'équivalent charbon	Production de charbon, en milliers de tonnes métriques	Production de pétrole brut, en milliers de tonnes métriques d'équivalent charbon [d]
États-Unis	1 453	6,92	435 963	328 017
Canada	870	6,40	17 345	3 562
Nouvelle Zélande	856	2,36	2 859	— [h]
Suisse	849	1,89	10	— [h]
Suède	780	2,82	317	— [h]
Royaume-Uni	773	4,30	218 570	60
Danemark	689	1,70	1 600	— [h]
Australie	679	2,91	21 826	— [h]
Norvège	587	3,97	— [h]	— [h]
Belgique	582 [a]	3,45	27 854	— [h]
Venezuela	322	0,64	24	89 716
Mexique	121	0,61	1 075	11 324
Brésil	112	0,20	2 129	19
Iran	85 [b]	0,33 [c]	170	35 408
Irak	85 [b]	0,16	— [h]	8 424 [e]
Koveit	40 [b]	1,33 [c]	— [h]	16 091
Arabie Séoudite	40 [b]	0,44 [c]	— [h]	48 259 [f]

Source : Bureau de statistique des Nations Unies, Département des questions économiques.

[a] Belgique-Luxembourg.

[b] Évaluations brutes.

[c] Chiffres pour 1952.

[d] 1 tonne métrique de pétrole brut = 1,3 tonne métrique de charbon.

2

de distributions aux États-Unis, par région et par source utilisée, en 1953

Pourcentage du nombre total de kWh produit à partir du charbon	Coût moyen du charbon par million de Btu (cents)	Pourcentage du nombre total de kWh produit à partir du pétrole	Coût moyen du pétrole par million de Btu (cents)	Pourcentage du nombre total de kWh produit à partir du gaz	Coût moyen du gaz par million de Btu (cents)	Pourcentage du nombre total de kWh produit à partir de la force hydraulique	Puissance hydraulique installée, en pourcentage du total de la puissance installée
49	27,1	9	32,4	18	16,7	24	24
34	36,3	47	34,7	[b]	34,0	19	21
71	29,6	11	33,4	6	29,4	12	10
90	26,0	1	65,7	6	20,2	4	4
39	28,4	5	48,3	46	20,6	10	10
63	27,2	14	32,4	9	21,4	14	22
48	20,0	[b]	32,6	14	15,9	37	46
[b]	11,4	1	44,0	95	9,5	3	12
7	23,0	4	24,5	20	18,5	69	68
[b]	13,3	13	28,7	15	24,0	72	63

Sud-Atlantique : Delaware, Maryland, District of Columbia, Virginie, Virginie Occidentale, North Carolina, South Carolina, Georgie, Floride;
Centre sud-ouest : Arkansas, Louisiane, Oklahoma, Texas;
Montagnes : Montana, Idaho, Wyoming, Colorado, New Mexico, Arizona, Utah, Nevada;
Pacifique : Washington, Oregon, Californie.

[b] Moins de 0,5 pour cent.

3

d'énergie dans divers pays choisis, en 1949

Total de la production de charbon et de pétrole brut, en milliers de tonnes métriques d'équivalent charbon	Production d'énergie hydraulique, en milliers de tonnes métriques d'équivalent charbon [g]	Total de la production de charbon, de pétrole brut et d'énergie hydraulique, en milliers de tonnes métriques d'équivalent charbon	Total du charbon, du pétrole brut et de l'énergie hydraulique, par habitant, en milliers de tonnes métriques d'équivalent charbon
763 980	59 233	823 213	5,52
20 907	31 808	52 715	3,92
2 859	1 817	4 676	2,49
10	5 979	5 989	1,29
317	9 403	9 720	1,40
218 630	734	219 360	4,36
1 600	— [h]	1 600	0,38
21 826	861	22 687	2,87
— [h]	9 707	9 707	3,00
27 854	— [h]	27 854	3,23
89 740	— [h]	89 740	18,75
12 399	1 303	13 702	0,55
2 148	1 694	3 842	0,08
35 408	— [h]	35 408	1,93
8 424 [e]	— [h]	8 424 [e]	1,65 [e]
16 091	— [h]	16 091	94,65
48 259 [f]	— [h]	48 259 [f]	8,04 [f]

[e] Chiffres pour 1950.
[f] Chiffres pour 1951.
[g] 1 million de kWh = 625 tonnes métriques de charbon.
[h] Chiffres non disponibles, néant ou quantités négligeables.

proportion de l'un à l'autre chiffre entre les régions où le combustible est le plus cher et les régions où il est le meilleur marché. Lorsque des variations importantes apparaissent, elles s'expliquent par des circonstances particulières, telles que la concentration d'industries électrochimiques ou électrométallurgiques, pour lesquelles le courant électrique constitue une matière première.

En général, l'utilisation de l'énergie électrique dans une région donnée est déterminée par un ensemble de facteurs d'ordre économique ou non économique qui caractérisent l'économie de cette région, et le coût de l'énergie électrique n'est que l'un de ces facteurs. Il s'ensuit que, à l'exception d'industries particulières qui utilisent l'électricité comme une véritable matière première, le coût du combustible consommé dans la production d'énergie électrique n'est qu'un facteur secondaire dans la détermination de la quantité d'énergie utilisée. La situation des marchés, la main-d'œuvre disponible, le coût des transports, l'emplacement des matières premières, etc., sont des facteurs autrement importants de l'installation et du développement des industries consommatrices d'énergie. Il est bien rare que l'on puisse dire que le coût de l'énergie électrique détermine les caractéristiques d'une économie.

Un autre élément nous aidera à mesurer la véritable influence du coût de l'énergie sur la prospérité de l'économie. Certains concluent parfois que l'*existence d'énergie disponible* est créatrice d'un revenu élevé. Les rapports de cause à effet ne sont cependant pas si simples. Un revenu élevé résulte du fait que d'importantes quantités de biens de capital qui consomment de l'énergie sont mises à la disposition de la production. Ainsi, une relation entre le revenu et la consommation d'énergie s'établit par l'intermédiaire du capital et des multiples forces, économiques et autres, qui déterminent les investissements et l'utilisation qui est faite des biens de capital. Le tableau 3 montre que si un revenu élevé par habitant coexiste avec une forte consommation d'énergie, il n'est pas dans tous les cas inséparable de disponibilités importantes en énergie situées dans le pays même. Là où existent d'autres facteurs favorables à l'activité industrielle, l'énergie nécessaire est importée. Une grande partie des réserves du monde en combustibles se trouve dans des régions insuffisamment développées qui exportent la plus grande partie de leur production vers des pays industrialisés. Le peu d'importance de la consommation d'énergie dans ces régions provient plus d'une insuffisance de la demande que d'un manque d'approvisionnement, et cette insuffisance à son tour résulte d'autres causes, d'ordre politique, social, économique, qui limitent la possibilité pour la société d'exploiter les ressources existantes.

Le tableau 4 apporte des preuves directes à l'appui de cette affirmation. Il présente en effet des données sur la répartition de la production d'énergie et du revenu par habitant aux États-Unis. Les états qui sont les plus gros producteurs de combustible, et qui figurent vers le bas du tableau, sont aussi ceux où le revenu par habitant est le plus faible; au contraire, ceux qui ont le revenu le plus élevé par habitant ne produisent que peu ou point de combustible. Les états qui produisent du combustible en exportent pour approvisionner en énergie les états gros consommateurs où les revenus sont élevés. On a vu au tableau 2 que les différences régionales entre les prix des combustibles utilisés dans la production d'énergie électrique jouent en faveur des états ou des régions qui sont les moins favorisés quant au niveau du revenu par habitant. Ni le manque d'énergie ni le prix élevé de l'énergie ne sont une cause nécessaire de la faiblesse du revenu.

Il paraîtra peut-être que, jusqu'ici, j'ai surtout énoncé un certain nombre de paradoxes statistiques. Nous savons en effet que dans une société moderne, l'énergie et son utilisation ont une tendance naturelle à se diffuser. Dans l'étude des rapports entre industries faite de 1951 à 1953 par le United States Bureau of Labor Statistics, l'économie des États-Unis telle qu'elle se présentait en 1947 a été décomposée en 190 activités aussi diverses que les industries de fabrication, les industries extractives, l'agriculture, le commerce et les services. Cette étude montre que ces 190 activités, à l'exception de trois d'entre elles seulement, consommaient des quantités assez importantes d'électricité. Les seules exceptions étaient la culture du coton et des plantes oléagineuses, les pêcheries, la chasse et le piégeage. Plus de 98 pour cent des bâtiments agricoles et des habitations aux États-Unis possèdent une installation électrique, et leur consommation d'électricité dans des appareils ordinaires très divers s'accroît à un rythme rapide. La tendance naturelle de l'électricité aux États-Unis à se répandre parmi les consommateurs peut servir à mesurer la productivité croissante de l'industrie, et aussi, quoique plus approximativement, de l'agriculture. Elle témoigne également du nombre toujours plus grand des éléments de confort et de bien-être grâce auxquels la vie à la maison est rendue toujours plus agréable.

L'énergie, je le répète, n'est qu'un des nombreux facteurs qui jouent un rôle très important dans la production de la richesse matérielle. On trouvera au tableau 5 l'indication pour 1947 du prix de l'énergie électrique et des quantités consommées dans vingt groupes d'activités de première importance aux États-Unis. Le tableau 6 reproduit les mêmes chiffres pour le groupe d'industries particulières qui sont les plus fortes consommatrices d'énergie électrique. Il résulte du tableau 5 que le coût de cette énergie représente 1 pour cent, voire moins, de la valeur totale de la fabrication, autrement dit une proportion infime. Même dans les industries qui sont fortes consommatrices, et où l'énergie électrique tend à faire figure de matière première dans la production, son coût représente une assez faible

Tableau 4

Tableau de certains États classés selon le revenu par habitant, et production d'énergie en 1951

État	Revenu par habitant (en dollars)	Classement selon le montant du revenu par habitant	Classement selon la production totale d'énergie	Pourcentage de la production totale d'énergie primaire des États-Unis	Ventes totales par habitant du courant alimentant les réseaux de distribution (kWh)
États-Unis (ensemble)	1 581	—	—	100,0	2 074
Delaware	2 192	1	48	0	2 022
Nevada	2 114	2	33	0,1	2 930
Connecticut	2 005	3	43	[a]	1 934
New York	2 003	4	23	0,4	1 994
Illinois	1 929	5	7	4,7	2 154
Californie	1 922	6	4	7,8	2 372
New Jersey	1 890	7	46	[a]	1 799
Ohio	1 796	8	10	2,8	2 804
Michigan	1 748	9	24	0,3	2 223
Washington	1 742	10	17	0,8	5 955
Montana	1 738	11	21	0,5	4 145
Wyoming	1 729	12	12	1,7	1 278
Pennsylvanie	1 663	17	3	10,8	2 498
Texas	1 386	30	1	26,8	1 599
Virginie occ.	1 185	39	2	11,8	2 554
Louisiane	1 131	40	5	6,6	1 438
Georgie	1 101	41	31	[a]	1 589
Kentucky	1 074	42	6	5,6	1 459
Tennessee	1 069	43	20	0,6	3 977
Caroline du Nord	1 043	44	29	0,1	1 721
Caroline du Sud	983	45	37	0,1	1 721
Alabama	942	46	15	1,2	2 459
Arkansas	924	47	19	0,7	1 491
Mississippi	775	48	16	1,0	849

Sources : U. S. Dept. of Commerce, Office of Business Economics, U. S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines, et Edison Electric Institute.

[a] Moins de 0,05 pour cent.

part de la valeur totale de la production, comme le montre le tableau 6.

L'énergie électrique joue naturellement un rôle essentiel parce qu'elle est indispensable au fonctionnement des biens d'équipement qui, utilisés dans les processus industriels, augmentent la productivité de l'homme. Le besoin d'énergie résulte de l'installation et de l'utilisation de biens d'équipement dans les activités productrices. Pour accroître la productivité et faire augmenter la consommation d'énergie, il est donc absolument indispensable de disposer de biens d'investissement sous la forme d'outils, de machines et d'équipement industriel. Un approvisionnement, existant ou potentiel, en énergie à bon marché, encouragera peut-être les industriels à installer des biens d'équipement qui consommeront cette énergie, mais il n'y a pas là une conséquence inévitable. La seule affirmation que l'on puisse énoncer ici sans l'entourer de réserves est que l'énergie électrique est d'une importance critique là où elle fait défaut.

Parmi les nombreux facteurs qui déterminent la mesure dans laquelle la production sera mécanisée, un facteur de première importance est l'existence d'un capital en quête d'investissements. On voit au tableau 7 que le coût des biens d'équipement consommateurs d'électricité dépasse infiniment le coût de l'énergie consommée et aussi le coût en capital des moyens de production d'énergie. Cela est également vrai d'un rasoir électrique qui consomme 1 kWh par an et d'une installation de diffusion gazeuse dont la consommation dépasse 15 milliards de kWh.

La même structure générale se manifeste lorsque nous observons l'utilisation de l'énergie électrique au foyer et à la ferme. La consommation domestique d'électricité aux États-Unis s'est accrue de façon spectaculaire aux États-Unis depuis 25 ans. Cette augmentation ressort du tableau 8. La consommation moyenne est affectée du coefficient 5. Au cours de ce quart de siècle, le coût moyen de l'énergie électrique à usage domestique a baissé de près

Tableau 5

Coût et consommation de l'énergie électrique dans vingt groupes d'activité industrielle d'importance majeure aux États-Unis

Activité industrielle	N° dans la classification type des industries	Énergie électrique				Coût de l'énergie électrique achetée (en milliers de dollars)	Valeur des produits expédiés (en milliers de dollars)	Énergie électrique achetée en pourcentage de la valeur des produits expédiés [c]
		Produite (10^6 kWh)	Achetée (10^6 kWh)	Vendue (10^6 kWh)	Consommée (10^6 kWh)			
Total, toutes industries		43 936	102 822	5 811	140 947	954 717	166 821 266	0,782
Produits alimentaires et connexes	20	1 838	8 427	85	10 180	108 531	31 958 377 [a]	0,41
Tabacs	21	76	155	12	219	2 174	2 541 241	0,12
Produits des usines textiles	22	1 959	8 288	206	10 041	82 456	10 980 608 [a]	0,91
Vêtements et produits connexes	23	18	837	5	850	20 567	10 383 274	0,20
Bois et produits du bois (sauf ameublement)	24	1004	1 503	169	2 338	19 964	4 691 931	0,66
Ameublement et accessoires	25	128	705	7	826	11 670	2 640 976	0,52
Papier et produits connexes	26	9 626	6 175	415	15 386	50 606	7 051 485	1,79
Impression et édition	27	39	1 251	10	1 280	23 796	6 354 901	0,38
Produits chimiques et assimilés	28	8 058	11 963	411	19 610	85 405	11 885 479	1,17
Produits du pétrole et du charbon	29	3 246	3 753	501	6 498	28 293	8 276 272	0,59
Produits du caoutchouc	30	810	2 650	15	3 445	24 685	2 716 447	1,18
Cuir et produits du cuir	31	117	475	19	573	8 888	3 673 849	0,29
Produits de pierre, d'argile et de verre	32	2 155	5 865	122	7 898	54 878	3 633 599	2,04
Industries métallurgiques primaires	33	11 851	31 428	2 634	40 645	188 784	16 600 000 [b]	1,47
Produits métalliques ouvrés	34	170	3 739	8	3 901	53 957	9 152 925	0,61
Machines (sauf machines électriques)	35	579	5 401	59	5 921	71 952	13 554 517 [a]	0,58
Machines électriques	36	574	3 156	114	3 616	34 578	6 221 765 [a]	0,63
Matériel de transport	37	1 497	5 552	988	6 061	59 242	8 944 031 [a]	0,73
Instruments et produits connexes	38	90	456	1	545	6 763	1 853 017	0,43
Produits fabriqués, divers	39	101	1 043	30	1 114	17 528	3 706 572 [a]	0,51

Source : 1947 Census of Manufactures.

[a] En partie évaluée; les évaluations constituent cependant une partie relativement faible du total.

[b] A l'exclusion des lingots d'acier, des expéditions de cuivre primaire, etc. Le total est en grande partie évalué.

[c] Pour déterminer ce pourcentage, on a calculé la valeur des produits qui est imputable à l'énergie achetée en appliquant à la valeur totale des produits le rapport de l'énergie achetée à l'énergie nette produite à l'usine même.

de moitié. Cette baisse des tarifs, jointe aux avantages que présente l'électricité par rapport aux autres formes d'énergie, a certainement contribué à répandre son utilisation. Malgré cela, l'augmentation des revenus est, à mon avis, une cause beaucoup plus importante de l'accroissement de la consommation. Ainsi que le montre le tableau 8, le revenu utilisable par habitant est de 2,5 fois plus élevé qu'il ne l'était au début de cette période. L'augmentation du revenu est pour une bonne part la conséquence de l'accroissement de la productivité, qui à son tour a résulté de l'investissement d'un capital toujours plus important par ouvrier dans le secteur de la production. Et en dernière analyse,

Tableau 6

Coût et consommation d'énergie électrique dans un certain nombre d'industries particulières aux États-Unis, en 1947

Industrie	N° dans la classification type des industries	Énergie électrique				Coût de l'énergie électrique achetée (en milliers de dollars)	Valeur des produits expédiés (en milliers de dollars)	Énergie électrique achetée, en pourcentage de la valeur des produits expédiés [b]
		Produite (10^6 kWh)	Achetée (10^6 kWh)	Vendue (10^6 kWh)	Consommée (10^6 kWh)			
Pâte, papier, carton	261	9 431	5 411	413	14 429	39 660	3 751 652	2,81
Produits chimiques inorganiques industriels	281	3 111	4 541	65	7 587	23 498	881 205	4,47
Produits sodiques et chlores	2 812	1 900	1 111	47	2 964	5 635	208 560	7,27
Ciment hydraulique	3 241	2 364	1 866	106	4 230	17 021	408 928	9,42
Produits électro-métallurgiques (acier)	3 313	1 282	3 621	—	4 803	13 519	150 904	11,71
Métaux primaires non ferreux	333	1 410	11 329	85	12 654	32 302	1 014 188 [a]	3,61
Cuivre	3 331	328	492	—	820	3 015	340 000 [a]	1,47
Plomb	3 332	8	133	—	141	981	300 000 [a]	0,35
Zinc	3 333	1 074	1 341	3	11 743	6 102	190 996 [a]	12,27
Aluminium	3 334		9 331	—		21 910	161 010	
Autres métaux non ferreux	3 339		32	—	32	294	22 182	1,32

Source : 1947 Census of Manufactures.

[a] Évaluation.

[b] Pour déterminer ce pourcentage, on a calculé la valeur des produits qui est imputable à l'énergie achetée en appliquant à la valeur totale des produits le rapport de l'énergie achetée à l'énergie nette produite à l'usine même.

Tableau 7

États-Unis : coût de biens d'équipement consommant de l'énergie électrique, consommation et coût correspondant, et coût de l'équipement énergétique nécessaire

Bien d'équipement	Coût du bien d'équipement (en dollars)	Consommation évaluée d'énergie électrique par an (kWh)	Coût évalué de la consommation annuelle d'énergie électrique (en dollars)	Coût évalué de l'équipement énergétique nécessaire (en dollars)
Rasoir électrique	25-30	1	0,028	0,125
Réfrigérateur	350-400	360	9,94	45
Grue à portique de 200 tonnes	300 000	40 000	400	1 800
Grue de 100 tonnes (aciérie)	200 000	20 000	200	900
Tour revolver 12 pouces (30 cm), hauteur de pointe 28 pouces (71 cm)	35 000	48 000	480	2 160
Usine équipée, par tonne d'aluminium en saumons et par an, y compris les installations pour le traitement de l'alumine	635	20 000	80	623
Installation de diffusion gazeuse	1 200 000 000	15 453 000 000	61 812 000	388 000 000

Source : Divers industriels, U. U. Dept. of Interior, Bureau of Mines, et communiqué de presse du 12 août 1952 de la Commission de l'énergie atomique.

Tableau 8

États-Unis : consommation pour usages domestiques (en kWh), coût du kWh, prix moyen du combustible (par kWh), indice des prix à la consommation, et revenu utilisable par habitant (1930-1954)

Année	Consommation moyenne pour usages domestiques (en kWh)	Coût de l'énergie électrique pour usages domestiques (en cents)	Prix moyen du combustible par kWh (en cents)	Indice des prix à la consommation 1947-1949 = 100	Revenu personnel utilisable par habitant (en dollars)
1930	547	6,03	— [a]	71,4	604
1931	583	5,78	— [a]	65,0	514
1932	601	5,60	0,24	58,4	389
1933	600	5,52	— [a]	55,3	364
1934	629	5,33	— [a]	57,2	411
1935	677	5,01	— [a]	58,7	458
1936	735	4,67	— [a]	59,3	517
1937	805	4,30	0,23	61,4	551
1938	853	4,14	0,22	60,3	505
1939	897	4,00	0,21	59,4	538
1940	952	3,84	0,23	59,9	576
1941	986	3,73	0,23	62,9	697
1942	1 022	3,67	0,25	69,7	871
1943	1 070	3,60	0,27	74,0	977
1944	1 151	3,51	0,28	75,2	1 060
1945	1 229	3,41	0,29	76,9	1 075
1946	1 329	3,22	0,32	83,4	1 126
1947	1 438	3,09	0,37	95,5	1 173
1948	1 563	3,01	0,42	102,8	1 279
1949	1 684	2,95	0,38	101,8	1 261
1950	1 830	2,88	0,35	102,8	1 359
1951	2 004	2,81	0,34	111,0	1 465
1952	2 169	2,77	0,33	113,5	1 509
1953	2 346	2,74	0,33	114,4	1 567
1954	2 549	2,69	0,32	114,8	1 561

Source : Edison Electric Institute, Department of Commerce et Bureau of Labor Statistics.

[a] Chiffres non disponibles.

c'est l'augmentation du revenu utilisable et sa distribution entre un plus grand nombre de personnes qui ont permis à l'usager d'acquérir ces nombreux appareils électriques qui s'offrent maintenant à lui aux États-Unis et qui expliquent l'importante consommation d'électricité à usage domestique. Je ne veux pas minimiser le rôle qu'a joué le courant à bon marché dans l'apparition de cette situation, mais seulement montrer que ce rôle n'a pas été essentiel. Lorsqu'un réfrigérateur représente une dépense en capital de 350 à 400 dollars, alors que le courant nécessaire à son fonctionnement représente moins de 10 dollars par an (tableau 7), on voit bien que ce qui influe sur la décision de l'acquérir ou non est le prix d'achat de l'appareil et non pas le prix du courant qu'il consomme. Si ce courant coûtait encore 20 dollars par an, comme il y a 25 ans, la somme serait encore faible par rapport au prix d'achat du réfrigérateur.

La situation à la ferme est assez différente de ce qu'elle est à la ville. L'électricité a rendu plus attrayante la vie rurale, qui autrefois n'était qu'une succession de mornes corvées. Grâce à elle, le fermier a pu s'éclairer, installer des pompes électriques pour amener l'eau, et utiliser des commodités de toute sorte qui autrefois semblaient réservées à la vie urbaine. L'énergie électrique a contribué de façon incalculable à accroître le bien-être des campagnards et à mettre fin à leur isolement. Mais quelle qu'ait pu être son importance à cet égard, elle ne suffit pas à expliquer la productivité accrue qui est le fait capital dans l'histoire récente de l'agriculture aux États-Unis. L'énergie électrique consommée dans la ferme américaine, de même que la consommation d'électricité par habitant, a augmenté plus de douze fois depuis 25 ans (tableau 9). Au cours de cette période, de nombreuses utilisations de l'électricité ont fait leur apparition à la ferme, et ont permis de produire en plus grande quantité ou dans de meilleures conditions les denrées alimentaires et les produits de l'élevage. Mais la principale contribution à cet accroissement de la

Tableau 9

Population, productivité, équipement mécanique et consommation d'énergie électrique dans les fermes aux États-Unis de 1930 à 1954

Année	Population agricole (en milliers d'habitants)	Indice de la production agricole pour la consommation humaine	Nombre d'heures/ouvrier [a] nécessaires dans les exploitations agricoles (en millions)	Production des exploitations agricoles [b] par heure/ouvrier	Valeur des machines (en millions de dollars)	Valeur des tracteurs dans les exploitations (en millions de dollars)	Énergie électrique consommée dans les exploitations agricoles (10^6 kWh)	Consommation agricole d'énergie électrique par habitant (en kWh)	Consommation non agricole d'énergie électrique par habitant (en kWh)
1930 .	30 529	95	22 753	87	3 302	920	1 789	59	116
1931 .	30 845						1 878	61	122
1932 .	31 388						1 579	50	123
1933 .	32 393						1 633	50	122
1934 .	32 305						1 857	58	130
1935 .	32 161	96	20 903	96	2 153	1 048	1 693	53	142
1936 .	31 737						2 138	67	156
1937 .	31 266						2 389	76	174
1938 .	30 980						2 528	82	186
1939 .	30 840						3 320	108	196
1940 .	30 547	110	20 520	112	3 060	1 545	3 355	110	216
1941 .	30 273	114	20 149	118			3 614	119	232
1942 .	29 234	128	21 057	127			4 285	147	244
1943 .	26 681	125	20 910	125			4 819	181	249
1944 .	25 495	129	20 768	130			5 135	201	275
1945 .	25 295	129	19 765	136	6 208	2 422	5 908	234	279
1946 .	26 483	133	19 465	143			7 278	275	315
1947 .	27 124	128	18 988	141			8 974	331	350
1948 .	25 903	140	18 808	155			11 393	440	382
1949 .	25 954	138	18 667	154			13 841	533	421
1950 .	25 058	136	17 354	164	12 968	3 615	12 309	491	492
1951 .	24 037	139	17 890	162	13 692	3 940	15 978	665	538
1952 .	24 819	144	17 303	173	15 650	4 170	17 479	723	594
1953 .		144	16 985	176	16 564	4 400	19 468		
1954 .							20 836		

Source : Statistical Abstract of The United States, Department of Commerce, et Edison Electric Institute.

[a] En termes d'équivalent d'heures/ouvrier, autrement dit, le temps passé par un travailleur adulte moyen pour accomplir les travaux agricoles.

[b] Indice de la production agricole (production disponible pour la consommation humaine) divisé par l'indice des besoins en heures/ouvrier.

productivité (que fait également apparaître le tableau 9) a d'autres origines. Si la productivité agricole s'est rapidement accrue alors que la population rurale diminuait, c'est surtout que les tracteurs et les appareils mécaniques se sont multipliés à la ferme. La consommation rurale d'énergie électrique par habitant ne dépasse que faiblement la consommation domestique moyenne des États-Unis. Ainsi, bien que la possibilité de consommer de l'énergie électrique et de posséder des appareils qui consomment cette énergie ait accru le bien-être du fermier en dépit de son isolement géographique, et lui ait rendu les informations et les distractions aussi accessibles qu'au citadin, la source de la richesse agricole doit être cherchée dans d'autres causes.

On souligne parfois les effets que produira l'énergie atomique sur les régions éloignées et inaccessibles du globe. S'il existe des raisons sérieuses d'attendre de pareils effets dans certaines parties du monde, il reste bien peu d'endroits aux États-Unis où le besoin d'électricité ne puisse absolument pas être satisfait. Une preuve éclatante en est que 98 pour cent des habitations urbaines et rurales de ce pays disposent maintenant d'électricité. Il est extrêmement rare que le raccordement à une ligne de transmission soit contre-indiqué pour des raisons économiques, et là où ce cas existe, les besoins en électricité sont probablement peu importants. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle la construction d'une ligne de transport en de tels endroits peut difficilement se justifier par des motifs d'ordre économique. Dans les conditions actuelles, ces régions déshéritées pourraient fabriquer leur électricité à l'aide d'une petite centrale à moteur diesel. Si des raisons d'importance majeure s'opposaient à la construction d'une centrale de ce genre, par exemple l'impossibilité de recruter le personnel nécessaire à son exploitation et à son entretien, les mêmes raisons s'opposeraient encore plus nettement à l'installation d'une pile nucléaire.

Tableau 10

Coût des combustibles aux États-Unis (1939-1953)

Année	Prix de vente moyen de la tonne de charbon gras à la mine (en dollars)	Prix d'achat moyen de la tonne de charbon gras consommé par les centrales alimentant les réseaux de distribution (en dollars)	Prix de vente moyen par barrel [a] du pétrole brut, au puits (en dollars)	Prix d'achat moyen par barrel du pétrole consommé par les centrales alimentant les réseaux de distribution (en dollars)	Prix de vente moyen au puits du gaz naturel (cents par million de pieds cubes) [c]	Prix d'achat moyen du gaz naturel consommé par les centrales alimentant les réseaux de distribution (cents par million de pieds cubes)	Prix d'achat moyen des combustibles par kWh net (en cents)
1939	1,84	[b]	1,02	[b]	4,9	[b]	0,21
1940	1,91	[b]	1,02	[b]	4,5	[b]	0,23
1941	2,19	[b]	1,14	[b]	4,9	[b]	0,23
1942	2,36	[b]	1,19	[b]	5,1	[b]	0,25
1943	2,69	[b]	1,20	[b]	5,2	[b]	0,27
1944	2,92	[b]	1,21	[b]	5,1	[b]	0,28
1945	3,06	[b]	1,22	[b]	4,9	[b]	0,29
1946	3,44	[b]	1,41	[b]	5,3	[b]	0,32
1947	4,16	[b]	1,93	[b]	6,0	[b]	0,37
1948	4,99	6,69	2,60	2,79	6,5	11,0	0,42
1949	4,88	6,50	2,54	2,15	6,3	12,3	0,38
1950	4,84	6,38	2,51	2,00	6,5	11,8	0,35
1951	4,92	6,42	2,56	2,11	7,3	13,6	0,34
1952	4,90	6,54	2,53	2,14	7,8	14,7	0,33
1953	4,92	6,52	2,68	2,05	9,2	16,7	0,33

Source : United States Department of Interior, Bureau of Mines, American Petroleum Institute, American Gas Association et Edison Electric Institute.

[a] 1 barrel = 158,98 litres.
[b] Pas de chiffres disponibles avant 1948.
[c] 1 million de pieds cubes = 28 000 m³.

J'ai essayé jusqu'ici d'évaluer le rôle de l'énergie dans l'économie des États-Unis, ainsi que les incidences, sur la production d'énergie, de la situation naturelle des combustibles et de leur coût. Lorsque l'on évalue les effets de l'énergie nucléaire, il faut se souvenir des progrès techniques qui ont fait leur apparition dans la production de l'énergie de source classique. Le tableau 10 montre qu'en dépit des hausses sensibles subies par les prix des combustibles classiques aux États-Unis depuis 14 ou 15 ans, les entreprises produisant de l'électricité pour le réseau public ont pu maintenir entre le combustible et l'unité d'énergie électrique produite, le rapport des prix à un taux à peine supérieur à celui de 1939. Si la dépense en combustible par kWh a suivi une évolution différente de 1939 à 1948, il faut en accuser la deuxième guerre mondiale et les caractéristiques de la période qui l'a immédiatement suivie, au cours de laquelle toute la capacité de production d'électricité, quelle qu'ait pu être son ancienneté technique, a été utilisée pour fabriquer de l'énergie en raison de l'insuffisance des moyens de production modernes. Depuis 1948, des centrales modernes à haut rendement ayant été construites en nombre toujours plus grand, et les centrales anciennes ayant pu être déclassées et mises en réserve, les dépenses en combustible par kWh ont commencé à baisser brusquement et semblent devoir continuer à baisser encore dans les années à venir. D'importants progrès techniques dans la production d'électricité de source thermique provoquant une baisse du prix de revient du kWh, et une économie dans la consommation totale de combustibles, retarderont le moment où l'énergie nucléaire fera sentir ses effets.

L'analyse à laquelle nous nous sommes livré jusqu'ici nous amène à conclure qu'il y a peu de chance de voir se produire à brève échéance, en matière d'énergie, de vastes bouleversements dans l'économie des États-Unis et dans la vie de leur population, à la suite du développement que prendrait l'énergie nucléaire. Pendant quelque temps encore, l'électricité de source nucléaire ne produira probablement que des effets négligeables sur la vie familiale et sur l'extension de la consommation d'électricité dans les ménages. Il en ira certainement de même de l'industrie légère, et même sur l'industrie mi-lourde les effets seront probablement peu sensibles.

En ce qui concerne l'industrie lourde et en particulier les industries qui consomment de grandes quantités d'électricité en tant que matière première, et où des facteurs de charge élevés réduisent l'incidence des coûts d'installation plus élevés des centrales atomiques grâce aux économies plus importantes de combustible que ces centrales permettent de réaliser, le développement de l'énergie atomique, qui concurrencera les combustibles de type classique, commencera peut-être beaucoup

plus tôt à produire des effets importants. L'un de ceux-ci sera vraisemblablement d'égaliser les dépenses de combustible d'une région à une autre du pays, puisque le coût du transport du combustible atomique sera pratiquement négligeable en raison du peu d'encombrement de ce combustible. Cet élément, à son tour, viendra peut-être accroître l'importance d'autres facteurs de caractère géographique, tels que le transport des matières premières et des produits finis jusqu'aux lieux de vente, lorsque des industries pour lesquelles la dépense en combustible revêt actuellement une certaine importance devront choisir leur emplacement.

Aux États-Unis, l'exploitation et l'utilisation de l'énergie se sont déjà énormément développées, et les progrès de la technologie élargissent encore son domaine. Cette constatation vient encore renforcer nos conclusions. En outre, les ressources en énergie primaire, indigène ou importée sont suffisantes, et aucune raison d'ordre économique ne fera obstacle à leur exploitation pendant très longtemps encore. Toutefois, la mise en valeur de l'énergie nucléaire a déjà apporté une importante contribution à l'économie des États-Unis et continuera certainement à en apporter d'autres.

La caractéristique de l'énergie nucléaire aux États-Unis est qu'elle aura des répercussions à long terme plutôt qu'un effet immédiat et important. Il y a maintenant plus de dix ans que la fission nucléaire a été révélée au monde en tant que réalisation praticable. Pendant cette décade, on a beaucoup fait pour mettre la puissance libérée par le noyau au service de la paix, de la production et de l'économie, mais à ce jour aucune centrale atomique commerciale ne fonctionne encore aux États-Unis, ni, pour autant qu'on le sache, en aucun autre endroit du monde. Notre gouvernement a récemment fait connaître que l'objectif de la production d'électricité destinée au secteur public était chiffré à 150 millions de kW pour 1958, soit un accroissement de près de 50 millions de kW par rapport à la puissance actuellement installée. Seule une très faible proportion de cette puissance additionnelle pourra, semble-t-il, être produite à partir de combustibles nucléaires, et les 50 millions de kW qui lui seront encore ajoutés après 1958 ne seront sans doute produits que pour une très faible part, eux aussi, à l'aide de ces combustibles. En résumé, plus de dix ans s'écouleront encore avant que les combustibles nucléaires ne produisent d'effets décisifs sur l'économie des États-Unis, mais certains effets secondaires commenceront peut-être à se faire sentir beaucoup plus tôt.

L'énergie nucléaire a captivé l'imagination du monde. Elle catalyse désormais tous les efforts déployés dans les laboratoires et les bureaux d'études. La recherche économique et scientifique s'intensifie et s'accélère aux États-Unis et dans le reste du monde. En particulier, l'énergie nucléaire a stimulé de nouveaux efforts parmi les techniciens de la production d'électricité. Aux raisons qui existaient déjà de hâter l'avènement de techniques nouvelles, au rendement plus élevé, dans la production d'électricité à partir des sources classiques, s'ajoute la perspective de voir les combustibles nucléaires entrer en concurrence avec les combustibles traditionnels. Ainsi l'énergie nucléaire apporte-t-elle une vigueur accrue à un de ses redoutables concurrents. L'apparition de cet esprit de concurrence, avec ses efforts stimulants, dans le domaine de la production d'énergie, ne peut manquer d'avoir un effet très favorable sur l'économie énergétique des États-Unis. Le jour est assurément proche où les taux de conversion des combustibles classiques en énergie électrique s'élèveront encore, passant de 37,5 pour cent, chiffre actuel déjà très favorable, à 40 pour cent. Par la suite, on peut encore espérer d'autres progrès qui porteront les taux de rendement jusqu'à 50 pour cent.

A cet égard, le programme de construction de piles nucléaires actuellement en cours d'exécution aux États-Unis, et exposé à cette Conférence dans d'autres communications, offrira certainement un intérêt tout particulier pour la technologie de l'énergie atomique qui se forme dans d'autres parties du monde. On reconnaît depuis un certain temps que la technologie américaine de l'énergie électrique produite par des moyens classiques est à ce point avancée qu'elle impose des exigences plus strictes aux applications de l'énergie nucléaire, si cette dernière doit pouvoir affronter avec des chances de succès la concurrence de l'électricité tirée des sources classiques. Pour cette raison, et aussi parce que toutes les parties continentales des États-Unis peuvent, à très peu d'exceptions près, s'approvisionner en combustibles d'un prix accessible, la production d'électricité de source nucléaire devra triompher d'une concurrence plus rude, et par là satisfaire à des exigences économiques et techniques plus sévères aux États-Unis qu'en d'autres pays où la technologie actuelle de la production d'électricité à partir de sources classiques est moins avancée, ou qui disposent de combustibles classiques moins abondants et d'un prix de revient plus élevé.

L'obligation faite aux plans américains de production d'énergie nucléaire d'assurer un rendement technique et économique plus élevé devient inéluctable, puisqu'il existe d'autres modes de production à haut rendement, mais cette obligation doit nécessairement amener à des résultats lointains qui seront plus favorables à l'économie. En outre, la contribution que les progrès réalisés aux États-Unis apportera ainsi à la technologie des autres pays sera très certainement portée sans délai à la connaissance de ces derniers, non seulement par le canal des périodiques spécialisés américains, mais aussi grâce à de très nombreuses institutions internationales, et aux procédures déjà bien fixées pour répandre et échanger des informations de caractère technique. On peut citer ici le CIGRE; la Conférence mondiale de l'énergie; des conférences spéciales comme celle-ci; enfin, des programmes

de visites qui ont l'appui aussi bien de chaque secteur de l'industrie américaine de l'énergie que du Gouvernement même des États-Unis, représenté en la matière par diverses institutions officielles.

Bien que jusqu'ici les combustibles de type classiques n'aient guère ressenti la concurrence des combustibles nucléaires, cela ne pourra manquer de se produire de plus en plus avec le temps. L'apparition d'une énergie nucléaire exploitable dans les conditions d'une saine économie est maintenant un élément additionnel de la concurrence que se livrent les combustibles classiques, aussi bien sur le marché de l'énergie électrique que sur les autres marchés où cette énergie peut venir en remplacer d'autres. A ce point de vue, l'énergie nucléaire agit déjà à la façon d'un nouveau stimulant et le fera encore bien plus à l'avenir, dans la recherche de rendements plus élevés pour l'extraction de combustibles classiques. Ceci est particulièrement vrai de l'industrie charbonnière. Le charbon est la source d'environ 50 pour cent de toute l'énergie électrique produite aux États-Unis, et la production d'énergie électrique à son tour absorbe plus du quart de tout le charbon extrait aux États-Unis. Cette recherche de hauts rendements à la production s'impose moins directement dans les industries du pétrole et du gaz. La production d'électricité ne représente qu'une partie peu importante des débouchés de ces combustibles, bien qu'à eux deux ils soient la source d'environ 27 pour cent de l'énergie électrique produite aux États-Unis. La concurrence de l'énergie nucléaire ne se fera sentir sur ces deux industries que dans la mesure où elle permettra à l'électricité de remplacer le gaz ou le pétrole dans certains processus industriels.

Grâce à la mécanisation et à l'élimination des centres de production à faible productivité, l'extraction de charbons gras aux États-Unis a porté son rendement de 4,85 à 9,0 tonnes nettes par homme et par jour entre 1929 et 1953. L'obligation de faire face à la concurrence future de l'énergie nucléaire est une raison nouvelle de poursuivre cet effort vers un rendement meilleur et des prix plus bas. A mesure que l'énergie nucléaire sera produite en plus grande quantité et trouvera un champ d'application plus étendue, elle aura nécessairement un effet retardateur sur la tendance à la hausse des prix du combustible classique. Ainsi, cette hausse du charbon, du pétrole et du gaz (tableau 10) aura tendance à être contenue et freinée à mesure que l'énergie nucléaire, venant remplacer ces combustibles, provoquera un réajustement du rapport entre l'offre et la demande sur le marché américain de l'énergie.

Cet effet retardateur exercé sur les tendances à la hausse des prix des combustibles classiques se fera probablement sentir en premier lieu dans des régions relativement éloignées des gisements de combustibles fossiles. La Nouvelle-Angleterre, par exemple, où le prix moyen du combustible dépasse de près de 50 pour cent le chiffre moyen pour l'ensemble des États-Unis (tableau 8) peut s'attendre à éprouver les effets bienfaisants de l'énergie nucléaire avant d'autres régions des États-Unis. Autrement dit, à mesure que les progrès réalisés dans la production d'énergie électrique de source nucléaire combleront le fossé existant entre le prix de revient de l'électricité nucléaire et celui de l'électricité produite dans une centrale de type classique, l'énergie nucléaire consolidera sa place vis-à-vis des formes d'énergie concurrentes et trouvera en premier lieu des débouchés profitables dans les régions où le prix du combustible est le plus élevé.

A longue échéance, le combustible nucléaire tirera surtout son importance du fait qu'il assure au pays des approvisionnements en combustible pour les années à venir. Les réserves de charbon des États-Unis ont été évaluées à 2 500 milliards de tonnes. Il semblerait qu'il y eût là de quoi suffire à nos besoins pendant plusieurs milliers d'années encore, même si la consommation devait augmenter très largement. On peut s'interroger sur la valeur de ce chiffre, et surtout se demander qu'elle proportion de ces réserves pourra être extraite en des conditions économiques, mais une évaluation même pessimiste permet d'affirmer qu'elles suffiraient aux besoins du pays en charbon pendant plusieurs siècles encore.

Cependant, plusieurs siècles représentent une période relativement brève dans la vie d'un pays, surtout s'il s'agit d'un pays dont la vie économique utilise de grandes quantités d'énergie, et ceci à un rythme toujours plus rapide. D'ici un quart de siècle tout au plus, la production totale d'énergie électrique des États-Unis avoisinera le chiffre de 2 350 milliards de kWh, dont 2 000 milliards alimenteront les réseaux publics. Même à supposer que l'énergie hydroélectrique doive représenter de 10 à 15 pour cent de la production totale, et que le gaz et le pétrole puissent y contribuer dans une proportion analogue, les quantités de charbon nécessaires pour produire le reste de l'électricité dans 25 ans seront de l'ordre de 525 à 550 millions de tonnes par an. Ceci dépassera largement le tonnage qui sera absorbé par d'autres utilisations. De plus, comme on le constate dès maintenant, le charbon devra continuer à alimenter d'autres marchés. Même en négligeant complètement le chauffage des maisons d'habitation, il reste la métallurgie qui, à la fin de la période considérée, absorbera peut-être 175 millions de tonnes par an. Il n'est pas impossible non plus que l'on fasse appel au charbon pour relayer le gaz et le pétrole sur les autres marchés de l'énergie qu'ils alimentent actuellement. Une telle demande de charbon, à ce point augmentée en l'espace de 25 ans, et atteignant peut-être un milliard de tonnes par an, est à rapprocher de la quantité totale de charbon gras extraite aux États-Unis en 1954, soit 392 millions de tonnes.

Quant au charbon et au gaz, bien que nous ne soyons pas exactement fixés sur l'importance des

réserves, on admet généralement qu'ils deviendront de plus en plus rares et chers au cours de la période considérée, en dépit d'une actuelle surproduction apparente de pétrole. La demande de ces deux combustibles s'est rapidement accrue et semble devoir continuer à s'accroître. A elle seule, la consommation d'essence automobile s'est trouvée portée à un coefficient voisin de 2,5 en 1953 par rapport à 1945, et selon les évaluations officielles elle pourrait augmenter encore de 70 pour cent et atteindre 2 085 millions de barrels* en 1975. Pendant cette même période 1945 à 1953, les ventes de gaz naturel ont augmenté dans les mêmes proportions et cette expansion se poursuit. La prospérité de l'économie a également fait se développer rapidement la demande de produits pétroliers en dehors des États-Unis, au rythme d'environ 10 pour cent par an, contre 5 pour cent approximativement aux États-Unis. Ainsi notre pays va devoir faire face à une compétition de plus en plus vive dans ses achats de pétrole extrait à l'étranger.

Tous ces éléments peuvent provoquer la décision de réserver le pétrole et le gaz naturel à des utilisations spéciales pour lesquelles aucun combustible de remplacement ne conviendrait. Tel est le cas par exemple de l'essence automobile, ou d'utilisations dans lesquelles l'élément du choix, bien plutôt que le prix, est la commodité, ou telle particularité technique rendant l'essence préférable à tout autre combustible.

Le tableau 11 donne une image frappante de ce que seront les besoins totaux en énergie aux États-Unis en l'année 197..., soit d'ici 20 à 25 ans — une plus grande précision dans la fixation de la date étant tout à fait impossible si longtemps à l'avance.

Ainsi, en prenant pour base les tendances qui s'esquissent à présent, et dans l'hypothèse où l'économie ne disposerait d'aucun combustible nouveau, tel que le combustible atomique, il sera nécessaire non seulement d'utiliser les ressources hydroélectriques, le pétrole, le gaz et le charbon d'une façon bien plus intensive qu'actuellement, ce qui mettra l'économie américaine en présence de difficiles problèmes d'approvisionnement. Le charbon en particulier aurait à supporter une part importante du fardeau constitué par ces besoins toujours croissants, et le chiffre d'extraction de 1954 (392 millions de tonnes) devrait être multiplié par un coefficient voisin de 2,5.

C'est en essayant de nous représenter ces vastes besoins en énergie qui se manifesteront dans le prochain quart de siècle que nous pouvons commencer à comprendre l'importance qui s'attache pour les États-Unis à produire de l'énergie nucléaire.

* 1 barrel = 159 litres.

Tableau 11

Répartition possible, par sources, des besoins totaux des États-Unis en énergie en 197.., non compris les effets de l'énergie nucléaire

	Tonnes d'équivalent de charbon gras (10^6)	
Production d'énergie électrique :		
Charbon gras	525	
Pétrole, gaz, énergie hydraulique		175
Charbon pour la métallurgie	175	
Autres charbons gras	230	
Anthracite	20	
Total des charbons		950
Essence automobile		415
Autres produits pétroliers		610
Gaz naturel		600
Besoins totaux en énergie		2 750

Peut-être pourra-t-on compter sur le charbon pour approvisionner la production d'énergie électrique et la métallurgie, et aussi pour remplacer, dans certaines de leurs utilisations, le pétrole et le gaz à mesure que leurs réserves s'amenuiseront. On se heurtera toutefois à des problèmes difficiles et à de graves difficultés lorsqu'on essaiera de porter à de tels chiffres annuels l'approvisionnement en charbon des États-Unis, tout en évitant de fortes hausses de prix. Et si nous regardons encore plus loin dans l'avenir, au-delà de cette période de 25 ans, alors que la demande d'énergie continuera de s'accroître, nous mesurons toute l'importance que prend l'énergie nucléaire.

A mesure que celle-ci se mettra à sa vraie place dans l'ensemble des besoins en énergie des États-Unis, elle aidera le charbon à en porter le fardeau toujours plus lourd, tout en réduisant au minimum les hausses de prix. Grâce à l'adjonction de l'électricité de source nucléaire aux autres ressources énergétiques du pays, les approvisionnements en énergie pourront continuer à être amplement assurés. Ainsi notre économie sera en mesure de poursuivre son développement dans la direction que lui impriment le génie propre de notre peuple et son esprit d'entreprise, et cela en ne faisant appel qu'à ses seules ressources, sans craindre qu'au moment où les réserves de combustibles fossiles viendraient à diminuer, il se produise une importante dislocation de sa vie économique due à l'insuffisance des approvisionnements en énergie. C'est dans ce rôle que l'énergie nucléaire trouvera aux États-Unis sa véritable justification.

Les perspectives de l'énergie électronucléaire à Porto Rico

PRÉFACE
par Ralph J. Watkins*

Depuis quelques années, les pouvoirs publics et l'initiative privée de Porto Rico sont heureusement animés de l'ambition bien arrêtée de faire progresser l'économie à un rythme rapide et constant, et selon des méthodes conformes au système de gouvernement d'une société démocratique. L'esprit de collaboration très poussé dont ont fait preuve les pouvoirs publics et les milieux d'affaires a été l'un des éléments essentiels de cet effort.

Porto Rico présente un intérêt particulier pour les États-Unis d'Amérique; d'autre part, cet état s'intéresse spécialement aux recherches entreprises sur les aspects économiques de l'énergie électronucléaire. Porto Rico doit s'adresser à l'extérieur pour la majeure partie de ses approvisionnements en énergie; la région doit en outre faire face, avec des ressources limitées, à l'accroissement très rapide d'une population déjà dense. Ainsi, le développement économique de Porto Rico évoque, à certains égards, les mêmes problèmes et les mêmes possibilités que d'autres régions du monde en voie d'industrialisation, et de ce fait, il peut servir d'exemple type pour une étude spéciale de la question.

La brève communication ci-après, qui porte sur le rôle possible de l'énergie nucléaire à Porto Rico, ne fera que présenter une étude plus vaste sous la forme résumée d'un avant-projet. Elle précède également un certain nombre d'études plus complètes que le personnel régulier et les consultants du projet d'utilisation pacifique de l'énergie atomique entreprennent actuellement dans d'autres régions parvenues aux stades de développement les plus divers, parmi lesquelles figurent le Brésil, l'Inde, l'Italie et le Japon.

La présente communication préliminaire sur Porto Rico est due à M. Alvin Mayne, du Puerto Rico Planning Board, et à M. Philip Mullenbach, Directeur de la recherche, Peacetime Atomic Energy Project, National Planning Association, à Washington, D. C. Elle a été rédigée, et elle est publiée, dans le cadre des documents de la Conférence des Nations Unies sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques, réunie à Genève du 8 au 20 août 1955.

La Commission spéciale sur les aspects économiques de l'utilisation pacifique de l'énergie atomique a autorisé le Président à recommander au Puerto Rico Planning Board de publier la présente communication et de la soumettre à la Conférence, sans pour cela reprendre à son compte ses conclusions**. La Commission ne présente pas de recommandation sur la politique à suivre dans ce domaine, et le fait qu'elle recommande la publication du présent document n'implique pas qu'elle en présente aucune.

LES PERSPECTIVES DE L'ÉNERGIE ÉLECTRONUCLÉAIRE A PORTO RICO
par Alvin Mayne *** et Philip Mullenbach ****

Nous exposerons ici les résultats d'une étude préliminaire sur le rôle que l'énergie nucléaire pourrait éventuellement jouer dans l'économie portoricaine. Cette étude a été entreprise par le Peacetime Atomic Energy Project, National Planning Association, dans le cadre d'une enquête plus vaste portant sur les aspects économiques de l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire aux États-Unis d'Amérique et dans d'autres pays. On a choisi Porto Rico comme sujet d'une étude spéciale parce que l'économie de l'île est en voie d'industrialisation rapide. Cette région dont la population dense s'accroît à un rythme accéléré, doit actuellement s'en remettre à ses importations de combustible pour faire face à une demande d'énergie électrique qui monte en flèche. Ont également joué un rôle important les plans et programmes que le

---

Original : anglais.

* Président de la Commission spéciale sur les aspects économiques de l'utilisation pacifique de l'énergie atomique, National Planning Association.

** Pour la liste des membres de la Commission qui ont participé à la préparation du présent document, voir à la fin du mémoire, p. 511.

*** Puerto Rico Planning Board.

**** National Planning Association, Washington, D. C.

Les auteurs désirent exprimer leur gratitude à la Direction des ressources hydrauliques et à d'autres services gouvernementaux de Porto Rico qui les ont aidés à se procurer certaines des données sur lesquelles se fonde le présent document. Les opinions exprimées ici engagent la seule responsabilité des auteurs.

gouvernement et les milieux d'affaires ont établis conjointement avec beaucoup de clairvoyance pour stimuler le développement de l'économie et élever le niveau de vie.

I

Pour continuer à développer son économie, Porto Rico doit surmonter certaines difficultés qui lui sont propres. Ses ressources naturelles sont très limitées. Porto Rico ne possède aucun gisement minéral dont l'exploitation commerciale se justifie, abstraction faite d'un gisement de minerai de fer évalué à environ 1 million de tonnes, et d'un peu de marbre et d'argile. La superficie cultivée est peu étendue — elle s'élève à 0,4 acre (1,6 are) seulement par habitant, contre 2,7 acres (1,08 ha) sur le territoire continental des États-Unis d'Amérique.

La principale ressource de Porto Rico réside dans sa population. Celle-ci s'élevait en 1950 à 2 211 000 habitants, pour une superficie de 8 896 km² seulement, soit une densité de 251 personnes au km², à peu près la même qu'au Japon. L'accroissement naturel de la population est de 2,9 pour cent par an, contre 1,5 seulement aux États-Unis d'Amérique.

Le Commonwealth de Porto Rico, qui est l'un des états constitutifs de l'Union, a l'avantage d'être compris dans le territoire douanier de celle-ci, mais, en contrepartie, ses industries doivent soutenir la concurrence des produits de la métropole. Le marché portoricain est restreint, en raison surtout de la modicité du revenu par habitant qui, en 1954, s'élevait à 445 dollars contre 1 760 environ aux États-Unis d'Amérique *. Une fraction importante de la main-d'œuvre est dépourvue de l'instruction et de la formation professionnelle nécessaires. L'un et l'autre de ces obstacles fondamentaux ont été aggravés par le rythme auquel s'accroissent la population et la main-d'œuvre, et par l'augmentation de la productivité des usines du continent américain qui font concurrence aux producteurs portoricains. Actuellement, 15 pour cent des travailleurs sont en chômage, et le sous-emploi est courant, particulièrement dans l'agriculture.

Ainsi, l'économie portoricaine est caractérisée par la densité et l'accroissement de la population, la pénurie de matières premières et l'insuffisance des sources locales d'énergie, et par la proximité de la partie continentale des États-Unis d'Amérique, à laquelle Porto Rico est rattaché du point de vue économique. Dans ces circonstances, l'économie portoricaine doit atteindre un triple objectif, à savoir : 1) créer de nouvelles possibilités d'emploi pour les nouveaux venus, les chômeurs et les travailleurs qui ne sont pas assurés de travailler en permanence, 2) relever le niveau de vie, et 3) continuer de soutenir la concurrence de la production du continent américain. Les résultats les plus prometteurs sembleraient devoir être obtenus grâce à l'implantation de nouvelles industries qui offrent les plus larges possibilités d'emploi par rapport à leur production. Toutefois, des industries qui, comme ces dernières, permettraient d'employer une main-d'œuvre nombreuse, ne peuvent prospérer que si elles sont assurées d'être approvisionnées en matières à bon marché. S'il était possible d'améliorer les approvisionnements en matières premières en créant dans le pays des usines de transformation, il y aurait lieu de le faire, même si cette mesure absorbait de gros investissements et ne créait directement qu'un nombre limité d'emplois nouveaux. En outre, si ces usines devaient permettre à Porto Rico d'obtenir des matières premières et des produits finis à un prix inférieur à celui des importations, elles favoriseraient indirectement le développement d'industries et de services exigeant une main-d'œuvre nombreuse et aideraient, de ce fait, à créer des possibilités de travail; elles rendraient possible une augmentation des revenus réels et permettraient à l'île de continuer à soutenir la concurrence de la métropole.

En dépit des obstacles qui entravent son expansion, l'économie a accompli des progrès surprenants depuis 1940. Ils sont dus en partie à l'œuvre accomplie par le Gouvernement fédéral, et en partie au fait que les pouvoirs publics et les milieux d'affaires portoricains ont très tôt pris conscience de la nécessité de réaliser un programme général de développement économique [1] **. Entre 1941 et 1952, le revenu familial a augmenté de 82 pour cent (en dollars constants). Le système économique est devenu moins tributaire de l'agriculture (elle comptait pour 31 pour cent dans le revenu global en 1940, et pour 17,5 pour cent en 1954) et s'est tourné vers la production industrielle et les travaux exécutés pour le compte des pouvoirs publics. Les exportations ont manifesté la même tendance; en 1940, les produits manufacturés représentaient à peu près 22 pour cent des exportations, contre 50 pour cent environ en 1954. Le taux de la formation de capital a plus que doublé. En 1954, il avait, avec le produit brut, le même rapport que sur le continent américain.

Malgré les progrès considérables de la production industrielle depuis 1940, l'histoire du développement économique de Porto Rico montre qu'il n'a pas été encore possible au cours des dernières années de s'attaquer avec succès au problème du chômage. Le chômage n'a guère diminué depuis 1950, bien que de nombreux émigrants se soient rendus sur le

* Eu égard au revenu par habitant, Porto Rico se trouve à mi-chemin entre les régions développées et les régions insuffisamment développées du monde. A titre d'exemple, voici le revenu par habitant de certains autres pays : d'une part, l'Équateur : 144 dollars, et les Philippines : 143 dollars; et d'autre part le Royaume-Uni : 715 dollars et le Danemark : 725 dollars.

** Les numéros entre crochets renvoient à la bibliographie qui figure à la fin du mémoire.

continent américain; ces émigrants représentent probablement la majeure partie des 55 000 travailleurs dont l'effectif de la main-d'œuvre s'est allégé au cours de cette période. La conjoncture sur le continent américain a influé sur l'émigration et l'activité économique de Porto Rico.

A Porto Rico, les taux de salaires qui étaient extrêmement bas à l'origine ont eu tendance à augmenter plus rapidement que sur le territoire métropolitain. Si l'on doit conserver l'avantage actuel de productivité de la main-d'œuvre par dollar de salaire à Porto Rico, il faudra donc que la productivité par heure-ouvrier de certaines industries augmente plus rapidement que sur le continent américain. Pendant les 10 ou 20 prochaines années, la formation du capital devra, elle aussi, augmenter à un rythme plus rapide qu'auparavant. Il se peut que les résultats d'une politique d'accroissement de la productivité du travail et de hausse des salaires — grâce à l'implantation d'industries exigeant d'importants investissements — tende, à court terme, à limiter les possibilités d'emploi et ne contribuent pas de ce fait à diminuer le chômage. Toutefois, le relèvement consécutif du niveau des revenus tendra à susciter des activités économiques exigeant l'emploi d'une main-d'œuvre nombreuse, qui trouveront peut-être leur origine dans la production des industries fortes consommatrices de capitaux, ou qui trouveront un débouché sur le marché intérieur. Il a été suggéré d'étendre le programme de travaux publics de manière à créer de plus nombreuses possibilités d'emploi. Un programme de ce genre n'est pas sans danger, car les deniers publics risquent d'être dilapidés dans des travaux improductifs. En tout état de cause, il faut admettre que l'économie portoricaine aura peine à conquérir une position concurrentielle sur les marchés tout en élevant le revenu par habitant et en poursuivant une politique de plein emploi.

II

Après avoir exposé rapidement les problèmes et l'évolution de l'économie portoricaine, nous sommes amenés à envisager la part que l'énergie et l'électricité ont prise dans son essor, et le rôle qu'elles pourraient jouer dans l'avenir. La situation générale de l'économie portoricaine, qui se caractérise par une industrialisation rapide, un revenu par habitant en voie d'augmentation et le rythme soutenu de la formation de capital, a entraîné une hausse rapide de la consommation d'énergie électrique ou autre, qui devra se poursuivre, voire s'accentuer, si le développement économique doit continuer à un rythme suffisamment rapide pour permettre de diminuer le chômage.

CONSOMMATION D'ÉNERGIE

Dans une économie en voie d'industrialisation, les besoins en énergie sous toutes ses formes, mais plus particulièrement en énergie électrique et en combustibles liquides, s'élèvent plus rapidement que le chiffre de la population, et, dans certains cas, que le niveau de l'activité économique. Entre 1940 et 1954, la consommation d'énergie électrique a plus que quadruplé à Porto Rico, où elle est passée de 152 millions de kWh à 702 millions de kWh. Pendant la même période, la consommation d'énergie électrique par dollar constant de revenu net du Commonwealth s'est trouvée multipliée par 2 1/4 puisqu'elle a passé de 0,39 kWh à 0,90 kWh. La consommation d'énergie par habitant a presque quadruplé au cours de la même période, mais elle était toujours inférieure au chiffre du continent (315 kWh contre 2 526 kWh par habitant).

Depuis 1940, la consommation portoricaine d'énergie électrique s'est accrue à une cadence 50 fois plus rapide que sur le continent américain. Chacun des secteurs de l'économie a contribué à cette augmentation. La consommation des ménages s'est élevée, en partie parce que des réseaux de distribution ont été installés dans des régions écartées de l'île et en partie parce que le revenu des familles s'est élevé au-dessus du niveau minimum incompressible. La création de nouvelles industries a porté sur des activités employant une main-d'œuvre nombreuse, de sorte que le niveau de la consommation d'énergie par salarié a été relativement bas. Cependant, il s'opère actuellement un « brassage » des activités industrielles, et l'on installe en ce moment des usines qui exigent d'importants investissements. Après la mise en activité de deux grandes raffineries de pétrole, Porto Rico se dirigera sans doute graduellement vers des industries exigeant des investissements plus importants et qui, non seulement consommeront d'abondantes quantités d'énergie électrique, mais encore tendront à susciter l'établissement d'autres industries qui exigeront, elles aussi, d'importants investissements, industries de produits pétrochimiques, des plastiques, des fibres synthétiques et fabriques d'engrais, qui par ailleurs seront à l'origine d'autres activités secondaires employant une main-d'œuvre plus nombreuse.

PRODUCTION D'ÉNERGIE

Depuis 1940, la production thermique d'électricité à Porto Rico s'est développée aux dépens de la production hydraulique. Entre 1940 et 1954, la part d'électricité produite par les centrales hydrauliques est tombée de la moitié au quart de la production totale. L'envasement des réservoirs a fini par poser de sérieux problèmes et a diminué la puissance existante. En outre, le potentiel des divers sites où il serait encore possible d'installer des centrales hydrauliques est peu élevé, et leur équipement entraînera de gros frais. On exécute actuellement les travaux de construction prévus par le programme de développement du sud-ouest de l'île, qui doivent fournir l'eau nécessaire à l'irrigation ainsi que de l'énergie.

Il serait théoriquement possible de produire 700 millions de kWh en tirant parti de tous les emplacements de l'île qui se prêtent à l'installation de centrales hydrauliques. A ce jour, on a mis en valeur des sites dont le potentiel est évalué à 310 millions de kWh et l'on installe des centrales qui développeront 135 millions de kWh supplémentaires. En 1954, la puissance installée des centrales hydrauliques de Porto Rico atteignait 108 000 kW, et leur production 216 millions de kWh, de sorte que le rendement aux bornes de la centrale était seulement de 23 pour cent. Ce faible taux d'exploitation résulte de l'insuffisance des précipitations et de la médiocrité des installations de retenue. Le coefficient de rendement des centrales thermiques était un peu plus élevé. En 1954, leur puissance installée atteignait 146 000 kW, et leur production 624 millions de kWh, chiffre correspondant à 49 pour cent de leur puissance.

Le coût actuel de production dans les nouvelles centrales thermiques donne une idée des conditions de la concurrence que l'énergie électronucléaire devra peut-être soutenir au cours des prochaines années. Le seuil que l'énergie électronucléaire devra franchir est un prix de production d'environ 8 millièmes de dollar le kWh, soit le coût d'exploitation en 1954 des centrales après la guerre. La centrale thermique du San Juan, dont la puissance installée atteignait près de 95 000 kW en 1954, a produit 512 millions de kWh, ce qui correspond à un taux d'utilisation de 62 pour cent environ. Le taux d'intérêt en vigueur des obligations à 30 ans récemment émises est de 3,5 pour cent. Pour un taux d'utilisation de cet ordre, et compte tenu du service des intérêts, les frais fixes de la centrale de San Juan se répartissent comme suit : intérêts : 1,3 millième de dollar, amortissement : 1,2 millième de dollar par kWh. Les frais d'exploitation se chiffrent ainsi : mazout : 4,0 millièmes de dollar, frais de fonctionnement : 0,6 millième de dollar, et frais d'entretien : 0,6 millième de dollar, soit au total un coût de production de 7,7 millièmes de dollar par kWh.

Au cours de 1954, la Direction des ressources hydrauliques a payé le mazout 2,10 dollars le barrel (environ 160 litres) contre 1,80 dollar en 1950. En 1954, le prix équivalait à 33 cents par million de Btu (c'est-à-dire 250 000 kilocalories) soit à peu près le prix du combustible de chaudière dans les états de la Nouvelle-Angleterre, que l'on considère comme une région des États-Unis d'Amérique où le prix des combustibles est relativement élevé.

ÉVOLUTION FUTURE DES PRIX DES COMBUSTIBLES

La vraie question est de savoir quelle sera l'évolution future du prix du mazout à Porto Rico. Les prix du mazout à Porto Rico seront déterminés par de nombreux facteurs. Citons notamment les modifications possibles de la structure des prix du pétrole, qui est actuellement uniforme dans le monde entier, l'influence du pétrole du Moyen-Orient sur le niveau des prix dans l'hémisphère occidental, et la politique officieuse de restriction des importations de pétrole aux États-Unis.

Porto Rico traverse une période de transition pour ce qui est du prix et des approvisionnements en pétrole. La construction de raffineries de pétrole entraînera l'importation de brut du Venezuela, et le pétrole résiduel produit dans les raffineries servira de combustible pour les chaudières en vue de la production d'énergie électrique. Si Porto Rico est en mesure de se procurer du pétrole à des prix qui ne se ressentent pas de l'accroissement du coût de production enregistré sur le continent américain, il se pourrait que les prix du pétrole brut dans l'île soient moins élevés au cours des prochaines années qu'actuellement, à mesure que le Moyen-Orient et d'autres régions mettront des tonnages supplémentaires à la disposition des marchés mondiaux. Il se peut au contraire, comme la Commission Paley l'avait prévu en 1952 lorsqu'elle projetait les conditions de la demande en 1975, que les prix du brut augmentent dans l'hémisphère occidental parce que la demande de pétrole dépassera l'offre de produits en provenance de la métropole, que les importations fassent ou non l'objet de restrictions artificielles. « ...Le prix du pétrole importé aux États-Unis sera sans doute plus étroitement fonction des coûts de production des producteurs marginaux de pétrole brut local et de pétrole synthétique que des coûts réels de production des pétroles étrangers [2]. »

Dans le passé, l'amélioration du rendement de la production portoricaine d'énergie électrique tirée du mazout a plus que compensé les effets de la hausse des prix des combustibles liquides. On ne cesse de perfectionner les procédés par lesquels le fuel-oil est transformé en énergie électrique. A mesure que l'on installera de nouvelles centrales destinées à répondre à l'accroissement de la demande, ces procédés continueront à s'améliorer. Dans l'ensemble, les hausses de prix qui pourront éventuellement se produire à Porto Rico au cours des prochaines années paraissent devoir être compensées par l'amélioration apportée au rendement futur de l'utilisation. Toutefois, si les prix du pétrole brut devaient baisser sur le marché mondial, la part du combustible dans le coût de production de l'énergie électrique diminuerait et celui-ci tomberait au-dessous de son niveau actuel. (Nous examinons dans les conclusions du présent document le rôle que les combustibles nucléaires et l'énergie électronucléaire pourraient être appelés à jouer dans cette évolution.)

AUTRES FRAIS

Il se peut que les frais fixes diminuent. Dans dix ans, on n'installera probablement plus de centrales d'une puissance inférieure à 100 000 kW, et le prix de revient d'une centrale, qui s'est élevé à 200 dollars par kW dans le cas de la centrale de

San Juan (40 000 kW), diminuera peut-être dans des proportions atteignant 10 pour cent, soit 0,3 millième de dollar par kWh. Il se peut toutefois que les taux d'intérêt continuent de monter. Le loyer des emprunts lancés par la direction des ressources hydrauliques a augmenté au cours des dernières années, et il n'est pas exclu que le montant des charges financières s'accroisse de 10 pour cent au cours de la prochaine décennie. Une telle hausse annulerait presque les économies réalisées grâce à l'augmentation de la puissance des centrales installées.

Le bilan de notre enquête sur les éléments du coût de production futur est que le coût global de la production d'énergie électrique dans les nouvelles centrales de type classique ne dépassera probablement pas, au cours des 5 ou 10 années à venir, 7 à 8 millièmes de dollar par kWh, prix de revient actuel de la production dans une centrale thermique au rendement satisfaisant, comme celle de San Juan.

BESOINS FUTURS EN ÉNERGIE

Après avoir étudié le coût de production de l'énergie, envisageons maintenant la capacité de production nécessaire pour faire face aux besoins de Porto Rico entre 1965 et 1975. C'est pendant cette période que l'utilisation de l'énergie électronucléaire, si elle se justifie du point de vue économique, devrait se généraliser. D'après les plans actuels de la Direction des ressources hydrauliques, la puissance installée devrait passer de 200 000 kW en 1955 à 397 000 kW en 1962. L'accroissement annuel des besoins, qui sera de l'ordre de 30 000 kW à peu près tout au long de ces 7 années, deviendra suffisamment important à la fin de cette période pour permettre d'envisager la construction de centrales de 100 000 kW à quelques années d'intervalle. Entre temps, toutefois, la Direction des ressources hydrauliques se propose pour 1962 de doubler la puissance aux heures de pointe, en mettant en service plusieurs centrales de moindre puissance : 2 petites centrales hydrauliques (12 000 kW et 9 000 kW) et deux centrales thermiques (44 000 kW chacune) en 1956, puis deux centrales thermiques d'une puissance de 44 000 kW également, qui commenceront à fonctionner en 1959 et 1962 respectivement.

L'évaluation des besoins en énergie en 1965 et 1975 repose sur deux projections de la situation économique de Porto Rico. La première est la projection d'une structure économique type qui assurerait le plein emploi, avec un revenu familial minimum de 2 000 dollars, aux prix de 1950. On peut considérer que la seconde illustre l'évolution la plus probable des conditions économiques. Comme les effectifs de la main-d'œuvre vont croissant, il faudra que le nombre des emplois passe de 540 000 en 1954 à 762 000 en 1965 et 878 000 en 1975 pour assurer le plein emploi (voir tableau 1). La production devant en même temps s'accroître, il sera indispensable que l'activité économique se développe plus qu'il ne faudrait pour combler la différence entre le niveau actuel de l'emploi et le plein emploi qui régnera dans l'avenir. En fait, il faut créer de nouveaux emplois pour occuper les travailleurs que l'accroissement de la productivité risque de faire passer constamment d'un emploi à l'autre.

Tableau 1

Projection de la population, des effectifs de la main-d'œuvre et du nombre d'emplois nécessaire

	Nombre d'habitants âgés de plus de 14 ans (en milliers)	Effectifs de la main-d'œuvre nécessaire (en milliers)	Nombre des emplois nécessaires [a] (en milliers)
1954 (chiffres réels). . . .	1 324	679	613 [b]
1960	1 469	764	695
1965	1 569	834	762
1975	1 800	955	878

[a] Non compris le chômage frictionnel, qui s'élève à 4 pour cent.
[b] Le nombre réel des emplois a été de 540 000.

Pour porter le revenu familial minimum à 2 000 dollars, le revenu familial *moyen* devra passer de 1 760 dollars en 1954 à 4 300 dollars (aux prix de 1950). On estime que depuis 4 ans la productivité du travail a augmenté de plus de 8 pour cent dans les usines qui ont bénéficié de l'assistance de l'Administration du développement économique. Pour que le revenu atteigne le chiffre désiré au bout de 20 ans, soit en 1975, il faudra que la productivité du travail augmente de 96 pour cent, ce qui est certes dans l'ordre des choses possibles. Pour que la productivité du travail s'accroisse à un rythme aussi rapide, l'économie portoricaine, et notamment l'importance relative de ses divers secteurs, devront se modifier profondément. En particulier, il faudra que les industries de transformation produisant pour l'exportation se développent. On trouvera au tableau 2 les estimations du revenu qui devrait être produit dans chaque secteur pour que le revenu familial atteigne le niveau désiré en 1975.

En appliquant les taux de la consommation d'énergie électrique par dollar de revenu que nous avons calculés pour 1950-1954 à la projection des revenus qui figure au tableau 1, on a pu faire la projection de la demande totale en énergie en 1965 et 1975, dans l'hypothèse où le plein emploi serait réalisé et où le revenu familial atteindrait le niveau désiré. D'après ces projections, la capacité installée, produisant dans des conditions de parfaite régularité, devra passer de 200 000 kW en 1955 à 1 104 000 kW en 1965 et 1 520 000 kW en 1975. Selon ce schéma, le revenu net augmenterait de 2 1/2 fois au cours de la prochaine décennie, mais la puissance des centrales électriques devrait

Tableau 2

Revenu net produit à Porto Rico. Structure type dans des conditions de plein emploi, le revenu familial ayant atteint le niveau désiré, 1965 et 1975

(En millions de dollars de 1950)

Secteur	1954 Chiffres effectifs	1965	1975
Agriculture	137	245	290
Industries de transformation	118	675	945
Commerce, services, etc.	330	930	1 200
Gouvernement du Commonwealth	115	300	350
Gouvernement fédéral	100	100	100
A déduire : Charges financières nettes	*19*	*40*	*50*
Total	781	2 210	2 835

sextupler. Ce calcul fait ressortir la pression très forte que l'augmentation du revenu exerce sur les besoins en énergie électrique, et aussi le rôle que l'énergie électrique doit jouer dans l'élévation du niveau de vie d'une région en voie d'industrialisation.

Il ne semble pas possible de réaliser le plein emploi et de porter le revenu familial au niveau désiré à une échéance aussi rapprochée que l'année 1965, et nous avons élaboré pour la période qui s'étend jusqu'en 1965 une autre structure type fondée sur l'extrapolation des tendances passées du développement économique et de la productivité du travail (voir tableau 3). Cette structure prévoit nécessairement qu'un chômage assez important continuera d'exister.

Si nous appliquons à nouveau le coefficient de l'énergie produite par dollar de revenu aux projections du revenu qui figurent au tableau 3, nous pouvons calculer les quantités d'énergie et la puissance nécessaires pour faire face aux besoins en 1960 et 1965. Selon cette hypothèse, la puissance installée devrait passer du chiffre actuel de 200 000 kW à 362 000 kW en 1960, et à 582 000 kW en 1965. Ce dernier chiffre ne représente que la moitié des besoins qui se manifesteraient si le revenu familial atteignait le niveau désiré. En admettant que ce niveau pourra être atteint en 1975, la puissance installée qui sera nécessaire à cette date, selon l'une et l'autre projection, s'élèvera à 1 520 000 kW.

Il semble, d'après l'autre extrapolation, qu'il faille une augmentation annuelle de 30 000 kW au cours des cinq années qui s'écouleront de 1955 à 1960; cette augmentation sera d'environ 50 000 kW pendant les cinq années suivantes (1960 à 1965), et approximativement de 90 000 kW pour les dix années suivantes. Cette hausse des

Tableau 3

Autre projection du revenu réel net, 1960 et 1965

(En millions de dollars de 1950)

	1954 Chiffres effectifs	1960	1965
Industries autonomes :			
Agriculture	65	80	100
Production de biens finis destinés à l'exportation	75	150	275
Construction (privée)	23	45	65
Gouvernement fédéral	100	100	100
Industries non autonomes :			
Production agricole destinée à la consommation intérieure	72	86	107
Production industrielle destinée à la consommation intérieure	43	53	66
Commerce, services, etc,	307	371	465
Gouvernement du Commonwealth	115	137	173
A déduire : Charges financières nettes	*19*	*22*	*26*
Total	781	1 100	1 325

accroissements annuels de puissance revêt de l'importance pour l'énergie nucléaire à venir, parce que le chiffre s'approche de la puissance des génératrices nucléaires qui présentent le plus d'intérêt du point de vue économique, à savoir 100 000 kW ou plus. Parce que Porto Rico est petit [100 milles (160 km) de long sur 35 milles (50 km) de large] et parce que la population et l'emploi sont et continueront d'être concentrés dans la région de la ville de San Juan, les augmentations de capacité peuvent se faire par tranches assez importantes, sans qu'il y ait besoin de prévoir de forts investissements pour de longues lignes de transport.

III

L'exposé qui précède permet de définir en partie les conditions d'ordre économique auxquelles l'énergie électronucléaire devra satisfaire pour jouer son rôle dans l'expansion future de l'activité économique et dans l'élévation du niveau de vie de Porto Rico.

Il se peut qu'après 1965 la capacité augmente suffisamment chaque année pour justifier la construction de centrales de 100 000 kW à des intervalles de temps rapprochés. De plus, pour soutenir favorablement la concurrence au centre de consommation de San Juan, il semble que l'énergie électronucléaire doive être produite au prix de revient de 7 à 8 millièmes de dollar le kWh, dans une centrale développant 100 000 kW ou davantage avec un coefficient d'utilisation de 65 à 80 pour cent.

A tenir compte uniquement du prix de revient, les besoins futurs de Porto Rico en énergie semblent offrir un avenir prometteur à l'énergie électronucléaire, à condition que le prix du mazout ne subisse pas une forte baisse au cours des 20 prochaines années. Si le prix du mazout reste stable ou augmente d'ici à 1975, il se peut que l'énergie électronucléaire permette de remplacer avantageusement l'électricité produite par les procédés classiques.

Quelles chances a-t-on de produire de l'énergie électronucléaire au prix de 7 à 8 millièmes de dollar? En 1954, la Commission de l'énergie atomique (CEA) des États-Unis d'Amérique a exprimé l'opinion suivante sur la possibilité de ramener le coût de production de l'énergie électronucléaire au niveau de 4 à 7 millièmes de dollar : « Dans l'état actuel de la technique, il n'est pas certain que l'on puisse abaisser le coût de production à un pareil niveau, mais on peut espérer y aboutir [3]. »

Cette hypothèse de la CEA se fondait sur les taux d'intérêt pratiqués habituellement pour les capitaux privés.

Les mesures que quatre groupes industriels financés par le secteur privé ont prises récemment aux États-Unis d'Amérique pour construire des génératrices nucléaires dont le coût serait, selon des évaluations, légèrement supérieur aux chiffres ci-dessus, semblent indiquer que des génératrices nucléaires assurées d'un avenir économique seront lancées sur le marché des États-Unis d'Amérique à une date plus rapprochée que ne le prévoyait la CEA. En ce qui concerne Porto Rico, on peut prévoir que l'énergie électronucléaire sera parfaitement capable de tenir sa place sur le marché dès 1960, année où l'on aura tiré le bilan du programme quinquennal de construction de piles de la CEA, et où quelques centrales seront déjà en fonctionnement sur le continent américain.

Toutefois, ni ces considérations ni ces perspectives ne devraient porter à croire que Porto Rico doive pour l'instant modifier ses plans de construction de nouvelles centrales de type classique. Étant donné les espoirs que suscitent les combustibles nucléaires et l'électricité qu'ils produiront, il faut cependant commencer dès maintenant à examiner dans quelle mesure l'énergie nucléaire pourra, au cours des dix prochaines années, remplacer dans de bonnes conditions économiques les centrales à mazout.

Le ravitaillement de l'île en pétrole et le prix futur de ce combustible sont les facteurs qui feront pencher la balance pour ou contre ses concurrents éventuels, les combustibles nucléaires et l'électricité qu'ils produiront. Nous avons vu qu'au prix de 2,10 dollars le barrel, ce combustible compte pour 4,0 millièmes de dollar par kWh dans le coût de production global, s'élevant à 7,7 millièmes de dollar, de la centrale thermique de San Juan dont le rendement est satisfaisant. Si le prix du mazout diminuait de moitié, et que le coût du combustible ne représentât plus que 2,0 millièmes de dollar/kWh, le coût global de production tomberait à 5,7 millièmes de dollar/kWh. Même dans ce cas, il se peut que les grandes centrales électronucléaires restent plus avantageuses, si leur coût est ramené à l'estimation la plus faible avancée par le CEA.

Jusqu'à présent, nous n'avons évoqué que les considérations tenant au coût relatif des centrales électronucléaires et des centrales à mazout. Les répercussions d'une telle substitution dépassent largement les économies qui seraient éventuellement réalisées sur les prix de revient, si importantes soient-elles. Non moins importante, bien qu'elle ait un caractère différent, est l'utilisation future à des fins multiples des rayonnements et des produits de fission dans les industries alimentaires, pétrolières et chimiques de Porto Rico. De même que l'utilisation généralisée de l'électricité et des combustibles liquides a contribué à l'essor du continent et d'autres pays en voie de développement au début du xx^{e} siècle, de même l'énergie nucléaire à des chances de se trouver à l'origine de nouveaux progrès et de nouvelles industries. Encore que cette question relève de la conjecture, il est de plus en plus évident que les utilisations de l'énergie atomique — autres que la production d'énergie électrique — offrent de grandes promesses sur le plan économique. En fait, dans une région en voie d'industrialisation comme Porto Rico, la possibilité d'utiliser des sources de rayonnement à haute activité, par exemple pour l'importante production portoricaine de denrées alimentaires, doit être examinée avec autant de soin que les perspectives d'utilisation de l'énergie électronucléaire.

IV

Reste à examiner dans quelle mesure Porto Rico possède les moyens de financer les plans d'accroissement de la puissance des centrales de type classique. Dans l'hypothèse où la puissance s'accroîtrait au rythme prévu ci-dessus, on estime que les capitaux nécessaires pour installer cette puissance seraient d'environ 11 millions de dollars par an entre 1960 et 1965, et supérieurs à 16 millions de dollars par an au cours des dix années suivantes. Il n'est pas impossible de trouver ces capitaux, si le taux actuel de formation du capital se maintient à Porto Rico. En 1954, la formation de capital a atteint 170 millions de dollars au total, dont plus du tiers a été investi dans l'achat de machines, et le solde s'est réparti presque également entres les travaux publics, la construction privée et les organismes financés régulièrement par les pouvoirs publics. En outre, Porto Rico peut avoir recours aux marchés des capitaux de la métropole. Ainsi, la réunion des capitaux à investir pour la construction de centrales électronucléaires ne devrait pas soulever de grosses difficultés, une fois que l'on aura démontré que leur exploitation soutient favorablement la comparaison avec d'autres centrales même si elles

exigent de plus gros investissements que les centrales à mazout. Bien entendu, les industries consommatrices d'énergie auront elles aussi besoin de capitaux importants. En ce qui concerne les disponibilités en capital, Porto Rico occupe une position unique parmi les régions insuffisamment développées : dans la plupart de celles-ci le taux de formation de capital est inférieur au sien, et, en outre, ces régions n'ont pas accès à d'importants marchés de capitaux. Ces deux facteurs incitent à développer à Porto Rico la production d'énergie exigeant de gros investissements, bien plus qu'il ne serait justifié de le faire dans d'autres pays insuffisamment développés.

Pour Porto Rico, l'énergie électronucléaire semblerait présenter certains avantages autres qu'économiques dont il faut tenir compte. En temps de guerre, l'île est dangereusement tributaire de la régularité des transports maritimes. Une réduction draconnienne des expéditions de pétrole, telle que celle qui s'est produite sur le côte orientale des États-Unis d'Amérique au cours de la deuxième guerre mondiale, aurait des répercussions moins graves en temps de guerre si Porto Rico utilisait un combustible nucléaire qui peut être transporté par air.

On serait sans doute porté à conclure de cette étude préliminaire des perspectives d'utilisation de l'énergie électronucléaire à Porto Rico que le rôle que cette énergie jouera apparemment dans le développement économique promet d'être intéressant, mais nullement exceptionnel. Les économies qu'elle permettra éventuellement de réaliser sur les dépenses en combustible, qui s'élèvent actuellement à 33 cents par million de Btu (moins de 4 millièmes de dollar le kWh dans les nouvelles centrales) semblent indiquer que la diminution du prix de revient ne suffira pas à modifier radicalement la structure du développement de l'industrie. Toutefois, c'est examiner la question d'une manière un peu superficielle. Si l'accroissement rapide de la capacité de production après 1965 exige l'installation annuelle de près de 100 000 kW, les importations de combustible liquide devront augmenter au rythme de 1 400 000 barrels (220 millions de litres) par an, soit une dépense de 3 millions de dollars aux prix de 1954. Ainsi, l'énergie électronucléaire peut constituer un avantage économique pour Porto Rico, dans la mesure où elle permettrait, à la longue, de remplacer le pétrole à des conditions avantageuses, et de rendre peut-être l'île moins tributaire de ses importations de mazout et de pétrole brut.

Vers 1975, la capacité de production devra être de 7 fois supérieure à son volume actuel pour permettre à l'emploi et au revenu d'atteindre les niveaux désirés. Dans ces circonstances, il semble judicieux d'examiner dans quelle mesure l'énergie électronucléaire, compte tenu des estimations actuelles des dépenses en capital et du coût d'exploitation, pourra d'ici cinq ans environ remplacer les centrales thermiques de type classique, lorsqu'on connaîtra les résultats de l'exploitation des centrales construites aux États-Unis d'Amérique. Les utilisation de l'énergie nucléaire à des fins autres que la production d'électricité, encore qu'elles soient du domaine de la conjecture, pourraient offrir une autre possibilité de découverte et de perfectionnement technique dans une économie orientée vers le progrès. Il faut évidemment étudier plus à fond ces possibilités, étant donné que Porto Rico doit orienter de façon équilibrée la formation de capital; il convient en effet d'assurer non seulement les investissements spécifiés ci-dessus, mais encore d'autres investissements non moins urgents.

NATIONAL PLANNING ASSOCIATION
1606 New Hampshire Ave., N. W.
Washington 9, D. C.

Ralph. J. Watkins (Président de la Commission), Director of Research, Dun & Bradstreet, Inc., 99 Church Street, New York, New York.

Richard M. Bissell, Jr., Room 226, Administration Building, 2430 E Street, N. W., Washington, D. C.

J. A. Brownlow, Président, Metal Trades Department, American Federation of Labor, 901 Massachusetts Avenue, N. W., Washington, D. C.

Gilbert W. Chapman*, Président, The Yale & Towne Manufacturing Co., 405 Lexington Avenue, New York, New York.

Gordon Clapp, Deputy City Administrator of the City of New York, 250 Church Street, New York, New York.

Walter W. Finke, Assistant du Président, Minneapolis-Honeywell Regulator Co., 2753 Fourth Avenue South, Minneapolis, Minnesota.

Marion H. Hedges, 5606 Warwick Place, Chevy Chase, Maryland.

Peter Henle, Assistant Director of Research, American Federation of Labor, 901 Massachusetts Avenue, N. W., Washington, D. C.

Murray Danforth Lincoln, Président, Farm Bureau Insurance Co., 246 High Street, Columbus, Ohio.

Dr. Edward S. Mason, Dean, Graduate School of Public Administration, Harvard University, Cambridge, Massachusetts.

Stacy May *, International Basic Economy Corporation, Room 5101, Rockefeller Plaza, New York, New York.

Arthur Moore, The Washington Bureau, McGraw-Hill Publications, 1189 National Press Building, Washington, D. C.

Leo Goodman, Secretary of the Committee on Power, Atomic Energy & Resources Development, CIO, 734 15th Street, N. W., Room 303, Washington, D. C.

Sumner T. Pike, Chairman, Maine Public Utilities Commission, Augusta, Maine.

* En voyage à l'étranger, n'a pas participé à l'élaboration de ce document.

Adolph W. Schmidt, Vice-Président, T. Mellon & Sons, 525 William Penn Place, Pittsburgh, Pa.

Dr. Henry D. Smyth, 110 Pyne Administration Building, Princeton University, Princeton, New Jersey.

Lauren K. Soth, *The Des Moines Register and Tribune*, Des Moines, Iowa.

Philip Sporn, Président, American Gas and Electric Service Corp., 30 Church Street, New York, New York.

Earl P. Stevenson, Arthur D. Little, Inc., Memorial Drive at Kendall Square, Cambridge, Massachusetts.

Elwood D. Swisher, Vice-Président, United Gas, Coke and Chemical Workers of America, 1840 California Street, Denver, Colorado.

Robert C. Tait, Président, Stromberg-Carlson Company, 100 Carlson Road, Rochester, New York.

J. Carlton Ward, Jr., Président, Vitro Corporation of America, 120 Wall Street, New York, New York.

BIBLIOGRAPHIE

1. Voir par exemple Chase, Stuart, « *Operation Bootstrap* » *in Puerto Rico*, Planning Pamphlet, n° 75, septembre 1951, National Planning Association.
2. *Ressources for Freedom*, The President's Materials Policy Commission, 1952, vol. 1., p. 109, United States Government Printing Office, Washington.
3. *Major Activities in the Atomic Energy Program*, United States Atomic Energy Commission, juillet 1954, Appendix 8, p. 122, United States Government Printing Office, Washington.

Les États-Unis ont besoin de petites génératrices nucléaires

par Samuel B. Morris *

L'objet du présent mémoire est d'examiner la nécessité où se trouvent les États-Unis d'Amérique de produire de l'énergie à bon marché en utilisant des centrales de dimensions réduites. On donnera un aperçu de la demande potentielle qui existe. On étudiera également dans quelle mesure on peut faire face à cette augmentation du nombre de petites usines grâce à l'emploi de petites génératrices nucléaires, au cas où il serait possible de construire des centrales atomiques qui puissent entrer en concurrence, pour la fourniture d'électricité aux réseaux de faible importance, avec les centrales thermiques chauffées aux combustibles usuels. On montrera qu'il y a là un vaste champ d'activité; il existe en effet aux États-Unis de nombreux réseaux électriques publics et des réseaux coopératifs ruraux qui représentent au total près de 2 900 réseaux indépendants de service public et environ 1 000 centrales privées pour les services publics et l'industrie.

AUGMENTATION DES BESOINS EN ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

La demande d'énergie électrique aux États-Unis s'accroît si rapidement qu'on peut en comparer le rythme à un raz de marée. Cet accroissement vertigineux impose à l'industrie électrique d'augmenter sa capacité de production pour satisfaire une demande sans cesse grandissante. Depuis le début du siècle, la forte augmentation de la population des États-Unis a été dépassée de loin par l'expansion de la capacité et de la production des centrales, ainsi qu'il ressort des chiffres cités au tableau 1.

Dans l'ensemble, ce rapide accroissement des besoins en énergie atteint presque le taux annuel composé de 7 pour cent; en d'autres termes, la puissance en kW et la production en kWh doublent tous les dix ans. Les charges des coopératives électriques rurales ont augmenté d'au moins 15 pour cent. Notons que le chiffre de la population ne s'est accru en moyenne que de 1,4 pour cent, de sorte que la population double en 50 ans. L'accroissement actuel de la population dépasse 2 pour cent par an. Si le taux d'accroissement des besoins en énergie se maintient au même niveau que par le passé, nous pourrons avoir en 1975 une capacité totale de production des centrales de l'ordre de trois ou quatre cents millions de kilowatts. Afin d'y faire face, les États-Unis doivent trouver les moyens financiers et techniques de produire davantage.

Tableau 1

Puissance et production des centrales électriques aux États-Unis

Année	Population	Puissance (en milliers de kW)	Production (en millions de kWh)
1900 . .	75 994 575	1 212 (1902)	2 507 (1902)
1910 . .	91 972 266	5 165 (1912)	11 569 (1912)
1920 . .	105 710 620	12 714	39 405
1930 . .	122 775 046	32 384	91 116
1940 . .	131 669 275	39 927	141 837
1950 . .	150 697 361	68 919	329 141
1954 . .	163 699 000	102 520	471 609

LES ÉTATS-UNIS SONT TRIBUTAIRES DES CENTRALES THERMIQUES

Les États-Unis bénéficient de possibilités hydroélectriques assez grandes, et les gisements de combustibles fossibles naturels sont importants. A l'heure actuelle, la capacité hydroélectrique représente 23 pour cent de la puissance installée et fournit 23 pour cent de l'énergie produite. On utilisera encore davantage les chutes d'eau pour accroître la production d'énergie hydroélectrique aux États-Unis, mais il devient de moins en moins facile de trouver de nouveaux emplacements convenables et l'augmentation du coût de ces installations indique que l'énergie hydroélectrique, qui ne permet déjà de faire face qu'à une faible proportion des besoins en énergie, représentera dans l'avenir un pourcentage encore plus faible de la puissance totale de production des centrales. En conséquence, à moins que l'atome ne produise une énergie dont le coût pourra être concurrentiel, on fera de plus en plus appel aux combustibles fossiles (gaz, pétrole et charbon, et peut-être schistes pétrolifères).

Original : anglais.

* Directeur et ingénieur en chef, Département des eaux et de l'énergie, Los Angeles, Californie, États-Unis.

Aujourd'hui, le gaz et le pétrole produisent 35 pour cent de l'énergie développée par les centrales thermiques. Les réserves reconnues ne dureront que vingt ans, mais il ne fait pas de doute que la découverte de nouvelles réserves prolongera cette période. Bien qu'à l'heure actuelle on découvre des réserves de pétrole au rythme de 1,6 barrel * par barrel consommé, cet état de choses favorable ne saurait se maintenir très longtemps, et l'accroissement de l'offre est largement compensé par une augmentation de la consommation. Dans la vie des nations et des peuples, la période d'utilisation du pétrole et du gaz est réellement courte.

Il faudrait, si possible, conserver ces combustibles pour les usages spéciaux où ils sont indispensables plutôt que de les consumer dans des centrales électriques. En revanche, nos gisements de charbon dureront beaucoup plus longtemps, mais ils n'ont aucune commune mesure avec les besoins futurs de l'homme dans cette région du monde. Et l'extraction du charbon coûte toujours plus cher.

L'une des utilisations où le pétrole fait prime est l'exploitation des centrales électriques à moteur diesel. Ce sont ces centrales qui équiperont le plus souvent les petits réseaux publics, particulièrement ceux des municipalités et des coopératives rurales.

LA SOLUTION PEUT RÉSIDER DANS LES CENTRALES ATOMIQUES

Comme les réserves potentielles d'uranium et de thorium doivent, selon des estimations, produire de l'énergie en quantités 23 fois supérieures à celle que produit le charbon, l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques permet d'espérer que l'on satisfera à ces besoins croissants. Les États-Unis intensifient leur effort pour mettre au point des piles atomiques d'utilisation pratique pour la production économique d'énergie électrique. Tout le monde reconnaît qu'il y a là d'immenses possibilités. Le gouvernement, l'industrie et le public demandent avec espoir que l'on atteigne ce but plus rapidement. Cependant, jusqu'à présent, on ne s'est guère préoccupé du marché important qui s'ouvre à la construction de petites piles.

LE PROGRAMME DES ÉTATS-UNIS EST ORIENTÉ VERS LA CONSTRUCTION DE GRANDES PILES

La Commission de l'énergie atomique des États-Unis a entrepris en 1954, 15 ans seulement après qu'on eut réalisé la fission nucléaire de l'uranium, l'application d'un programme prévoyant la construction de cinq centrales atomiques expérimentales. Chacune d'elle produira d'importantes quantités de chaleur pouvant être convertie en énergie électrique au moyen d'un équipement normal de turbines et de générateurs. L'une des centrales aura une production de 60 000 kW.

La majeure partie des projets d'utilisation de piles atomiques portent sur des puissances de 75 000 à 100 000 kW ou même davantage. Il est vrai que plusieurs piles en construction ont une puissance de 5 000 kW seulement, mais ce sont les prototypes de grandes piles, et elles ne sont conçues ni pour une exploitation efficace et rentable à 5 000 kW ni pour la mise au point de critères plus sûrs pour la construction de petites piles d'une puissance variant de 5 000 à 75 000 kW.

Ce programme de mise en valeur est déjà dépassé et la Commission de l'énergie atomique des États-Unis a annoncé son intention d'augmenter son programme de deux nouvelles piles. Cela en portera le nombre à sept, chacune d'entre elles servant à expérimenter une conception de base différente pour la production d'énergie thermique destinée à être transformée en électricité par des groupes de turbo-générateurs de type classique ou modifié.

La Commission de l'énergie atomique a déjà été saisie de cinq demandes de construction de grandes centrales atomiques émanant de services de distribution d'électricité agissant soit individuellement soit en groupe. Quatre sont destinées à des services de distribution du secteur privé, et une à un service public. Les piles ont des puissances variées, allant de 75 000 à 236 000 kW, et leur puissance totale atteint 700 000 kW. Aucune de ces demandes n'a été présentée par un petit réseau de distribution et aucune ne porte sur une pile dont la puissance serait plus faible et varierait entre 5 000 et 75 000 kW.

LA DEMANDE ACTUELLE DE PETITS GROUPES GÉNÉRATEURS THERMIQUES

Il y a aux États-Unis environ 1 900 réseaux municipaux de distribution d'électricité et 1 000 coopératives électriques rurales, ce qui donne au total un chiffre de 2 900. La demande de piles de faible puissance pour ces centrales, si ce type de pile se révèle rentable, proviendra surtout de ce marché. Les réseaux de distribution du secteur privé sont en général beaucoup plus importants et chacun dessert de nombreuses villes. Toutefois, eux aussi ont un grand nombre de petites centrales, situées près des centres de consommation de moindre importance en vue de réduire le coût du transport.

On trouvera au tableau 2 une estimation du nombre de petits réseaux électriques exploités en 1953 qui avaient une capacité de production inférieure à 150 000 kW et qui peuvent utiliser des groupes générateurs développant 75 000 kW ou moins.

Afin d'évaluer les débouchés qui s'offrent aux petites centrales dans les réseaux de distribution d'électricité tant du secteur public que du secteur privé, on a supposé, lorsque l'opération était rentable, que chaque service installerait un groupe développant la moitié de la puissance totale du réseau. C'est sur cette base que le tableau 2 a été préparé.

* 1 barrel = 158,98 litres.

Tableau 2

Nombre et puissance des petits réseaux électriques aux États-Unis

Puissance du réseau (en MW)	Groupe développant la moitié de la puissance du réseau (exprimé en MW)	Nombre de réseaux			1953 Puissance totale en MW		
		Secteur privé	Secteur public	Total	Secteur privé	Secteur public	Total
10 ou moins	5 ou moins	124	838	962	336	2 201	2 537
11 à 30	6 — 15	33	75	108	623	1 506	2 129
31 à 70	16 — 35	32	21	53	1 564	930	2 494
71 à 150	36 — 75	25	10	35	2 698	1 120	3 818
TOTAL		214	944	1 158	5 221	5 757	10 978
Puissance moyenne des réseaux . .					24	6	10

C'est là une capacité totale de production qui est assez importante : elle représente 12 pour cent de la capacité totale de production des centrales des États-Unis en 1953. Si l'on part de l'hypothèse déjà exposée de groupes générateurs ayant une puissance inférieure de moitié à la puissance totale du réseau, le nombre possible de centrales à installer au cours des dix années qui suivront 1953 serait approximativement de 1 160, et leur puissance moyenne de 10 000 kW. Si l'on accepte le fait historique du doublement de la puissance en 10 ans, on peut raisonnablement s'attendre que les besoins en 1973 seront d'au moins 1 160 centrales d'une puissance moyenne de 20 000 kW. On atteindra ce stade dès que les piles atomiques auront pu devenir une importante source supplémentaire d'énergie pour les réseaux de distribution. Cette estimation ne tient pas compte des remplacements qui augmenteraient la possibilité d'installer de nouvelles centrales. Si ces centrales sont plus rentables, il est hors de doute que les remplacements se succéderont à un rythme plus rapide.

Tableau 3

Petites centrales d'usines

Puissance de la centrale [a] (en MW)	Nombre de centrales d'usines	Puissance totale en 1953 (en MW)	Puissance moyenne des centrales (en MW)
Centrales reliées à des réseaux :			
5 ou moins	276	663	Moins de 3
6 - 15	97	938	10
16 - 35	65	1 544	24
36 - 75	24	1 179	49
Total	462	4 324	9
Plus de 75	12	1 651	138
Total des centrales reliées à des réseaux	474	5 975	12,6
Centrales non reliées . .	326	9 877	30,3
Total des centrales d'usines représentant 80 pour cent de la production industrielle . . .	800	15 852	20

[a] On a supposé que les remplacements de centrales d'usines doubleraient la puissance existante de la centrale, car en général elles ne développent pas leur propre puissance de réserve.

Il y a en outre des centrales d'usines enregistrées auprès de la Commission fédérale de l'énergie, et dont près de 60 pour cent sont reliées à un réseau de distribution d'électricité.

Sur les 474 centrales d'usines reliées à un réseau, 12 seulement ont une puissance supérieure à 75 000 kW. On ne dispose pas de renseignements détaillés sur les centrales d'usines non reliées à un réseau. Toutefois, comme la puissance moyenne de l'ensemble de ces dernières est de 30 300 kW, contre 12 600 kW pour les centrales d'usines reliées à des réseaux, il est évident que le nombre des centrales qui ont une puissance inférieure est plus faible que 800, total des centrales d'usines enregistrées auprès de la Commission fédérale de l'énergie; il peut cependant s'élever au total à 750.

En résumé, on estime à près de 2 000 le nombre des petits réseaux de distribution et des petites centrales d'usines représentant une demande potentielle de génératrices de 75 000 kW au maximum :

	Centrales
Réseaux du secteur public . . .	944
Réseaux du secteur privé	214
Centrales d'usines	750
	1 908

PROBLÈMES DE RECHERCHE ET DE MISE AU POINT CONCERNANT LES PILES DE PLUS FAIBLE PUISSANCE

Il est sans doute vrai que les grandes génératrices nucléaires coûteront moins par kWh produit que les petites génératrices, à la fois pour ce qui est de la construction et de l'exploitation. Cependant, il se peut que les génératrices nucléaires de petite dimension soient plus vite en mesure de concurrencer les petits groupes générateurs actionnés soit à la vapeur soit au moteur diesel; en effet, ces petites centrales de type classique produisent de l'énergie dans des conditions moins économiques que les grandes centrales thermiques d'une puissance de 75 000 à 250 000 kW. Le nombre de ces petits groupes générateurs est plusieurs fois supérieur à celui des grandes centrales. La mise au point et la fabrication en série d'un grand nombre de petites génératrices offrent donc de plus grandes possibilités du point de vue économique, et c'est là un élément qui doit les mettre en position favorable pour la concurrence.

Le prix de revient du kWh dans les petites centrales actuelles, y compris les dividendes et l'amortissement, est en général de 8 à 15 mills* et pour les centrales modernes plus importantes, de 4 à 8 mills. En conséquence, les petites piles atomiques produisant de l'énergie à 6 ou 8 mills ou plus pourraient concurrencer les petites centrales actuelles. Par contre, les grandes piles devraient produire de l'énergie à 4 ou 6 mills le kWh, ou à un prix un peu plus élevé dans les régions où le combustible coûte cher, pour pouvoir concurrencer les centrales thermiques modernes d'une puissance de 75 000 à 250 000 kW.

Les services publics et les industries qui utilisent ces petits groupes générateurs sont généralement moins en mesure de contribuer aux dépenses qu'entraînent les recherches sur la mise en valeur de l'énergie atomique; il apparaît donc que le gouvernement ne devrait pas subventionner seulement les recherches portant sur les piles de grande puissance, mais aussi celles qui ont trait aux piles de moindre puissance.

Il est de bonne politique, et il est rentable pour le pays, d'aider la petite ville, la société ou la coopérative rurale à réduire le coût de l'énergie afin que l'exploitation se maintienne et qu'elles puissent fournir à leurs clients de l'énergie électrique à un prix qui soutienne la concurrence. Ces petites installations serviront de champ d'expérience pour la mise au point de génératrices nucléaires plus grandes dont pourraient avoir besoin par la suite les plus importants de ces services de distribution.

* 1 mill = 1 millième de dollar.

LES ORGANISMES DE DROIT PUBLIC ET LES COOPÉRATIVES EMPRUNTENT A DE FAIBLES TAUX D'INTÉRÊT

Il convient de tenir compte du fait que les municipalités et les coopératives rurales empruntent des fonds pour leurs investissements en biens d'équipement à un taux plus faible. Selon la législation fédérale en vigueur depuis plus de 20 ans, les coopératives rurales empruntent des fonds à 2 pour cent d'intérêt, amortissables en 40 ans. La municipalité peut en général émettre des obligations exonérées de l'impôt et emprunter des fonds à 2,25 ou 2,75 pour cent pour des obligations d'État remboursables en 40 ans, alors que mêmes les grandes sociétés doivent payer de 3 à 3,5 pour cent lorsqu'elles se procurent des fonds pour la construction de leurs grandes centrales thermiques. Cet avantage dont bénéficient les municipalités et les coopératives rurales devrait beaucoup les aider à faire d'importants investissements en vue de produire à un coût d'exploitation peu élevé et améliorerait ainsi la position des génératrices électronucléaires à faible puissance sur le marché.

LES PETITES INSTALLATIONS PRÉCÈDENT GÉNÉRALEMENT LES GRANDES

La turbine à vapeur a commencé à être utilisée au début du siècle, et depuis lors elle a été adoptée généralement pour les grandes centrales thermiques. Pendant les trente premières années, presque toutes les centrales installées étaient ce que nous appellerions aujourd'hui « petites », c'est-à-dire d'une puissance inférieure à 75 000 kW.

C'est seulement au cours des vingt-cinq dernières années que l'on a utilisé des centrales plus grandes; celles qui développent plus de 100 000 kW n'ont commencé à fonctionner que pendant la dernière décennie, et encore sont-elles peu nombreuses.

N'était la grande économie que représentent ces grandes centrales fonctionnant à des températures et à des pressions élevées et dotées de cycles de réchauffement, il est tout à fait vraisemblable que la mise en valeur de l'énergie atomique aurait commencé par de petites génératrices; l'expérience aidant, on serait passé ensuite aux très grandes génératrices.

Dans toute l'industrie mécanique et dans le monde entier, on a toujours commencé par de petites unités pour passer à des unités de plus en plus grandes, en cas de succès.

Ceci est vrai aussi bien des navires, des trains, des dragues, des barrages que des centrales électriques. Dans une industrie qui n'a que dix ans d'âge, il faut garder l'esprit ouvert à toutes les possibilités, et il convient de consacrer des études et des recherches aux possibilités qui s'offrent à la petite génératrice nucléaire, qui pourrait se faire une place sur cet important marché. Voici un exemple de l'évolution qui se produit dans ce domaine : l'auteur de

la présente communication a entendu le Président de la Commission de l'énergie atomique affirmer que les piles devraient développer plus de 100 000 kW pour pouvoir être rentables; un an après, le Directeur du service de construction des piles de la Commission de l'énergie atomique jugeait que la pile de faible dimension avait gagné du terrain.

IL EXISTE UN IMPORTANT MARCHÉ POUR LES PETITES GÉNÉRATRICES NUCLÉAIRES

Le fabricant qui pourra mettre au point et construire de petites génératrices nucléaires développant de 5 000 à 15 000, de 16 000 à 35 000 et de 36 000 à 75 000 kW satisfera une demande importante venant des petits réseaux de distribution d'électricité, particulièrement les réseaux des petites villes et des coopératives rurales. Cette petite génératrice nucléaire devrait également trouver des débouchés toujours plus nombreux dans les mines et autres industries isolées.

Bien que cela ne soit pas le sujet du présent mémoire, il vaut la peine de mentionner ici que la fabrication et la vente de petites génératrices nucléaires doivent avoir une grande valeur économique et sociale, non seulement aux États-Unis, mais dans des régions du monde isolées et actuellement sous développées. En fait, dans la plupart de ces régions, l'emploi économique de grandes génératrices nucléaires ne se justifie guère ou pas du tout. Mais les petites génératrices y ont une place toute trouvée, parce que le marché de l'énergie est encore à créer. L'autre solution, pour ces marchés dispersés, est d'avoir recours à l'énergie hydraulique, si cela est possible, ou à de petites centrales thermiques de type classique. Le transport des combustibles usuels nécessaires pour satisfaire ces nouveaux marchés d'énergie électrique dans les régions insuffisamment développées suppose des opérations difficiles et onéreuses.

RÉSUMÉ

Cette demande et ces possibilités apparentes qui s'offrent aux petites génératrices nucléaires développant moins de 75 000 kW soulignent combien il importe d'intensifier le travail de mise au point dans ce domaine. Nous avons montré que parmi les avantages que présentent les petites génératrices pour les municipalités, les coopératives rurales et les autres services publics, il faut compter le faible coût du financement qui devrait réduire le service de la dette de leurs usines. De nombreuses petites villes et coopératives rurales utilisant des centrales à moteur diesel ont à faire face à la hausse du prix du fuel-oil et à un risque de pénurie future.

L'Association nationale des coopératives rurales d'électricité et l'Association américaine des services publics d'électricité, dont les membres, en grande majorité, exploitent de petites centrales, se rendent de plus en plus compte qu'il faut stimuler la recherche et la mise au point de petites génératrices nucléaires; elles ont à cet effet, soit créé des groupes d'étude, soit négocié des « accords de collaboration » avec la Commission de l'énergie atomique.

La possibilité d'utiliser les petites piles atomiques pour satisfaire aux besoins rapidement croissants d'une importante partie de la population et de l'industrie nationale exige de nous un effort; nous ne pouvons ni l'ignorer ni le négliger. La mise au point de moyens techniques et financiers permettant de satisfaire ces besoins croissants en énergie non seulement des petites collectivités des États-Unis mais aussi d'autres régions du monde où les petites centrales nucléaires peuvent relever rapidement le niveau de vie, représentera un des plus grands avantages que l'on puisse retirer de l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques.

Rôle que peut jouer l'énergie nucléaire en tant que source d'énergie au cours des 25 à 50 années à venir

par Walker L. Cisler *

L'histoire de la civilisation montre les rapports étroits qui existent entre l'utilisation de l'énergie et les progrès de l'humanité.

A l'origine, les limites de l'activité humaine étaient celles de sa puissance musculaire. Plus tard, l'homme apprit à dresser les animaux pour l'aider dans ses travaux physiques. Plus tard encore, il allait découvrir comment utiliser l'énergie des vents et celle des chutes d'eau. Les moulins à vent, la roue hydraulique et les bêtes de somme allaient lui permettre d'étendre le domaine de ses activités et de multiplier les travaux qui faciliteraient ses progrès.

En inventant la machine qui permettait de transformer l'énergie thermique en force et en l'appliquant au mouvement mécanique, l'homme ouvrait une ère où ses progrès allaient se précipiter. On pouvait employer des quantités d'énergie de plus en plus considérables et accomplir ce qui jusque-là était irréalisable. L'ère industrielle était née et la civilisation avançait à pas de géant, comme avec des bottes de sept lieues. L'énergie ainsi libérée, jointe au mouvement mécanique, n'en demeurait pas moins très limitée. Elle ne pouvait être employée qu'au lieu même ou tout près du lieu où cette énergie et ce mouvement étaient produits. L'énergie ne pouvait être transmise que par des courroies ou des arbres de transmission, et sur de très courtes distances seulement. Tous ces procédés montraient cependant que l'application de l'énergie était un fait, positif et évident.

Enfin, il y a moins d'un siècle, un progrès ouvrit à l'homme de vastes perspectives, des perspectives presque illimitées. Il avait découvert un procédé pratique pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Le grand avantage de l'électricité était que l'on pouvait la transporter sur des distances relativement considérables. En outre, sa remarquable souplesse permettait de l'employer à des usages très divers. On pouvait, par exemple, la reconvertir en énergie mécanique dans les moteurs et l'employer à faire fonctionner des machines. On pouvait également l'utiliser pour l'éclairage et pour d'autres besoins variés, électrochimiques, électrométallurgiques, etc. L'homme continue à trouver un grand nombre d'utilisations à cette source d'énergie si diverse, non seulement pour s'épargner des travaux pénibles, mais pour produire en grande abondance des marchandises utiles et nouvelles, offertes à tous à bas prix, et qui améliorent sans cesse le niveau de vie dans le monde.

Dans le monde d'aujourd'hui, le progrès de l'humanité et l'emploi de l'énergie vont de pair. On reconnaît généralement que le progrès est plus lent dans les régions où l'emploi de l'énergie s'est peu développée et où les conditions de vie sont moins élevées. L'énergie, et tout particulièrement l'énergie électrique, est devenue comme un symbole universel des services que l'homme, quel qu'il soit, peut obtenir. Elle est la même partout, quel que soit le langage dont on se sert.

SOURCES CLASSIQUES D'ÉNERGIE

Jusqu'à présent, les sources fondamentales de la production de l'énergie électrique étaient : 1) la chaleur dégagée par la combustion du charbon, du pétrole ou du gaz, et 2) l'énergie des chutes d'eau.

Si les combustibles fossiles et les ressources hydrauliques du monde sont au total très considérables, elles ne sont pas réparties équitablement entre les différents pays. Elles ne sont pas non plus situées au mieux des intérêts de tous les pays, compte tenu des frontières nationales et des besoins de leurs populations respectives. C'est pourquoi des ressources d'énergie nombreuses restent inexploitées à cause d'une situation géographique défavorable, tandis que d'autres ressources, mieux situées, ont été exploitées de façon intensive. Il peut se faire aussi que, par suite de l'existence de frontières nationales ou politiques, des ressources de faible rendement soient exploitées dans certains pays soucieux de leur indépendance économique, alors même qu'il existe, à des distances géographiquement praticables, des ressources plus faciles à

Original : anglais.

* The Detroit Edison Company.

exploiter mais situées sur le territoire d'un autre pays. La situation se complique encore lorsque certains pays sont parfois obligés d'importer, sous une forme ou sous une autre, une proportion considérable de l'énergie dont ils ont besoin. Des problèmes d'ordre économique et politique se posent alors, qui ne portent pas seulement sur la possibilité de disposer de ces ressources, mais encore sur les conditions des échanges monétaires.

Ces considérations compliquent gravement toute la question des ressources d'énergie et, dans l'ensemble, tendent à retarder les progrès qui pourraient être réalisés.

Dans beaucoup de régions où l'énergie a été utilisée très largement, les besoins ont augmenté dans de telles proportions que le degré maximum d'exploitation semble atteint, ou que l'on envisage même l'épuisement des ressources classiques. Et partout, avec l'expérience de l'histoire, les limites prévisibles de cette exploitation inspirent de graves inquiétudes.

ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Mais la science vient de libérer une nouvelle et puissante source d'énergie — l'atome fissile — qui nous apporte toutes les raisons d'espérer pouvoir compléter nos ressources classiques d'énergie dont la quantité va en s'amenuisant. Le combustible nucléaire présente un avantage immédiatement apparent et dont les conséquences peuvent être considérables : sous un volume réduit, il constitue une source d'énergie énorme, ce qui en fait le combustible le plus aisément transportable. Les ressources d'énergie hydraulique sont, géographiquement parlant, absolument fixes. Quant au charbon, au pétrole et au gaz, les distances sur lesquelles ces combustibles classiques peuvent être transportés sont limitées par des considérations d'ordre économique. Les combustibles nucléaires, au contraire, présentent des quantités formidables d'énergie sous un très petit volume, très aisément transportable. De sorte qu'en fin de compte, la fixité des ressources hydrauliques et les problèmes de transport que posent les combustibles classiques cesseront d'être des facteurs limitatifs en matière d'énergie. En outre, la mobilité des combustibles nucléaires permettra de compenser pour une large part l'inégalité de la répartition des ressources énergétiques classiques entre les nations. Cette nouvelle forme d'énergie semble donc permettre de vastes espoirs pour l'avenir et promettre un progrès continu du niveau de vie dans le monde.

La question qui nous occupe ici concerne le rôle de l'énergie nucléaire en tant que source d'énergie pendant les 25 ou 50 années à venir. L'énergie nucléaire sera probablement appliquée, bien entendu, à des besoins essentiels autres que la production d'énergie : aux traitements thermiques industriels, par exemple, au chauffage des habitations, à la propulsion des navires, pour n'en citer que quelques-uns. Les aspects de la question sont si variés que nous nous bornerons, dans ce document, à étudier l'emploi de l'énergie nucléaire en tant que nouvelle source thermique susceptible de créer l'énergie électrique.

Quelques-uns des facteurs limitatifs les plus importants sont les suivants : 1) les quantités disponibles de matériaux atomiques essentiels pour la production d'énergie électrique; 2) le degré de développement technique indispensable pour l'exploitation de l'énergie nucléaire; 3) les aspects économiques de l'emploi de l'énergie nucléaire par rapport aux sources classiques d'énergie; 4) les conditions économiques existant dans les régions sous-développées; le degré d'adaptabilité éventuel de l'économie locale à l'emploi de l'énergie électrique; 5) les problèmes de financement que pose l'équipement des entreprises de fourniture d'énergie électrique.

RESSOURCES EN MATÉRIAUX NUCLÉAIRES ESSENTIELS

Pour que l'énergie nucléaire puisse jouer un rôle important en tant que source d'énergie, il est évident qu'il faut disposer de matériaux de base — uranium et thorium — en quantité suffisante. Bien que ces deux éléments aient été découverts il y a plus d'un siècle, ni l'un ni l'autre n'avaient fait l'objet d'une exploitation commerciale. De sorte que, jusqu'à une époque toute récente, la « prospection » de ces matériaux nucléaires était demeurée insignifiante.

Depuis 15 ans, cependant, on s'est efforcé de plus en plus de découvrir des gîtes exploitables et de mettre au point des méthodes nouvelles et efficaces pour traiter les minerais d'uranium et de thorium. La plupart des renseignements à ce sujet — portant notamment sur les quantités de minerais déjà traités — sont demeurés secrets. L'étendue réelle des ressources nucléaires mondiales pose donc encore un point d'interrogation. Il convient cependant de remarquer que les recherches indiquent que les ressources mondiales de matériaux atomiques sont très considérables.

L'évaluation que donne Palmer Putnam dans son ouvrage *Energy in the Future* indique que les combustibles nucléaires économiquement exploitables représentent 23 fois plus d'énergie calorifique que l'ensemble des ressources mondiales en combustibles fossiles — charbon, pétrole et gaz. Les nombreux exposés relatifs aux gîtes d'uranium et de thorium et à la récupération de ces deux matériaux prouvent que de vigoureux efforts sont faits pour produire des quantités suffisant aux besoins du temps de paix.

Les quantités d'uranium et de thorium découvertes et le volume de minerais traités ne cessant d'augmenter, il est permis d'espérer qu'on pourra disposer de matériaux nucléaires de base en quantité suffisante pour permettre une production consi-

dérable d'énergie. Le problème de la répartition équitable des matériaux nucléaires entre toutes les nations du monde présente certains aspects économiques que nous discuterons plus tard, et d'autres, d'ordre politique, qui ne sont pas du domaine du présent exposé.

ÉVOLUTION TECHNIQUE DE L'EXPLOITATION DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Le rôle que peut jouer l'énergie nucléaire en tant que source d'énergie dépend évidemment en grande partie des progrès réalisés dans le domaine de la technique.

Il faut construire des piles dont l'exploitation soit à coup sûr rentable et permette d'alimenter convenablement un service de distribution d'énergie électrique. Il faut donc mettre au point une technique qui permette d'employer une proportion importante du potentiel thermique total des combustibles nucléaires et non pas seulement la part très réduite qu'utilisent la plupart des piles dont on envisage actuellement la construction. Il faut aussi que cette technologie des piles soit mise au point de manière telle que les systèmes d'énergie ne dépendent pas, pour le combustible, de préparations coûteuses et d'installations de traitement du genre des installations de séparation isotopique, elles-mêmes grosses consommatrices de force électrique.

Il est vrai que depuis que la fission atomique est devenue, en 1945, l'objet d'une science très répandue, des progrès techniques constants ont été réalisés dans la mise au point des méthodes pratiques d'utilisation de l'énergie nucléaire. Il s'en faut cependant encore de quelques années que les piles atomiques puissent être considérées comme un moyen pratique de produire de l'énergie électrique.

Aux États-Unis d'Amérique, par exemple, on ne construit que très peu de piles destinées à la production d'énergie, et il ne s'agit pour la plupart que de petits appareils d'expérimentation. Une seule pile de ce genre (destinée à la propulsion du sous-marin *Nautilus*) a été achevée et mise en service. On dit qu'elle fonctionne de façon satisfaisante. Mais les informations que l'on possède à ce sujet semblent indiquer que si la pile du *Nautilus* servait à faire fonctionner une génératrice électrique, le coût de l'électricité ainsi produite serait prohibitif au regard du coût de l'énergie produite par les procédés classiques.

Cette pile pour sous-marin confirme néanmoins le fait que le processus de la fission nucléaire peut être dirigé et maintenu dans certaines limites et qu'après de nouveaux progrès, les combustibles nucléaires pourront éventuellement produire de l'énergie électrique dans des conditions rentables.

Les États-Unis d'Amérique mettent actuellement en œuvre un programme considérable dont on espère qu'il fera faire de grands progrès à la technologie des génératrices nucléaires. La Commission de l'énergie atomique des États-Unis a inauguré, il y a un an, un programme de construction de piles portant sur cinq types de piles différents. En mars 1955, des propositions en vue de la construction de quatre grandes génératrices nucléaires ont été soumises à la Commission de l'énergie atomique par des entreprises de fourniture d'électricité, dans le cadre d'un programme expérimental de génératrices nucléaires. Le projet de construction d'une vaste installation de génératrices nucléaires lui a été également soumis. Ces différents projets fourniront des renseignements et dispenseront une expérience qui permettront d'arriver à construire des piles mieux conçues et capables de produire de l'énergie. Il est essentiel, cependant, de souligner que la plupart de ces piles exigent un combustible enrichi et que leur fonctionnement dépend donc du traitement de certains combustibles que, seuls, actuellement, les services officiels peuvent mener à bien.

On observera que deux des piles dont la construction est proposée — l'une figure au programme de construction des piles de la Commission de l'énergie atomique, l'autre au programme des génératrices nucléaires expérimentales — sont du type des piles autorégénératrices. Elles peuvent transformer plus de matériaux fertiles (uranium-238 ou thorium-232) en matériaux fissiles que leur fonctionnement n'en exige. Il leur faut une charge initiale de matériaux fissiles enrichis, mais elles peuvent ensuite produire assez de combustible pour assurer leur propre fonctionnement, plus un excédent de combustible pouvant être employé dans d'autres piles.

Les piles autorégénératrices représentent le seul type de piles pouvant utiliser une grande partie de l'énergie thermique potentielle des matériaux atomiques actuels. A moins qu'on ne parvienne à mettre au point avec succès ce type de pile autorégénératrice, on ne disposera peut-être pas de combustible nucléaire en quantité suffisante pour répondre aux besoins d'une industrie atomique de l'énergie électrique à l'échelle mondiale.

Il est certain que d'importants progrès en matière de technologie des génératrices nucléaires sont réalisés ailleurs qu'aux États-Unis. Nous sommes mal renseignés à ce sujet. Mais il se peut fort bien que la technologie des piles progresse, dans plusieurs pays, à peu près à la même allure qu'aux États-Unis.

On peut certainement dire que la mise au point des piles nucléaires destinées à produire de l'énergie est déjà assez avancée, mais il n'est pas sûr, néanmoins, que la qualité technique des piles actuellement en construction ou dont la construction est envisagée, ni leur prix de revient, en justifie l'emploi généralisé.

Il est un aspect du développement de l'énergie atomique qu'il convient de ne pas négliger lorsqu'on évalue le rythme des progrès permettant de résoudre

les problèmes qui se posent. C'est celui-ci : les génératrices nucléaires répondent à certains objectifs déterminés par le genre de service qu'on en attend. La technologie, la mécanique, l'économie ont fait des progrès considérables tant en ce qui concerne la production d'énergie que la transmission, la transformation et la distribution de la force. Ces progrès se poursuivent. Les piles doivent donc s'intégrer dans un système existant et pour ainsi dire, « s'aligner » sur les différents éléments des systèmes classiques de production d'énergie thermique ou hydraulique, et progresser de pair, avec ces systèmes : ce qui imposera un redoublement de l'allure des travaux de recherche et de mise au point. Cette situation ne peut manquer, à mon avis, de stimuler les efforts des savants qui étudient l'énergie nucléaire, et les résultats viendront peut-être plus tôt que nous ne les attendons. Le désir de réussir n'en est que plus fort. On espère, avec plus de confiance que jamais, voir réalisés les progrès indispensables en matière de technologie des piles. Ceux qui participent activement aux travaux sur les piles s'accordent en général à penser qu'il faudra encore dix ans d'efforts persistants et acharnés ou même davantage. Au cours de ces dix années, on construira un grand nombre de piles. Il s'agira sans doute pour la plupart d'installations de caractère expérimental destinées à permettre l'étude des problèmes de technique et de mécanique ainsi que du fonctionnement et de l'entretien de ces installations. Il semble plausible que les installations qui seront faites par la suite sur la base de l'expérience ainsi acquise auront une valeur pratique et seront rentables.

Devant l'incertitude évidente qui règne encore en matière de technologie des piles, il est extrêmement malaisé de prédire quel peut être, à plus longue échéance, le rôle de l'énergie nucléaire. S'il est certain, par exemple, que dans les vingt-cinq prochaines années l'énergie nucléaire fera sans aucun doute d'immenses progrès, il m'apparaît cependant douteux qu'elle puisse fournir plus qu'une fraction relativement minime de la consommation totale d'énergie dans le monde. Pendant les vingt-cinq années suivantes — c'est-à-dire entre vingt-cinq et cinquante ans d'ici — il semble raisonnable d'admettre que l'énergie nucléaire sera employée sur une vaste échelle pour compléter les ressources classiques d'énergie en vue de satisfaire les nouveaux besoins.

CONSIDÉRATIONS ÉCONOMIQUES RELATIVES A L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE COMPARÉE AUX SOURCES CLASSIQUES D'ÉNERGIE

En face du profond espoir de voir l'énergie nucléaire hâter l'avènement d'une vie plus riche et meilleure, on a généralement tendance à négliger les exigences économiques qui régissent son emploi comme source pratique d'énergie. Il est bien clair, cependant, d'un point de vue pratique, que l'emploi des combustibles nucléaires ne se justifie que si le coût de l'énergie ainsi produite ne dépasse pas celui de l'énergie produite à partir du charbon, du pétrole ou du gaz, et soit même moins élevé.

Autant qu'on puisse en juger à présent, les méthodes actuelles de production d'énergie ne seront pas sensiblement modifiées par l'emploi des combustibles nucléaires, sauf en ce qui concerne la production de l'énergie thermique finalement convertie en énergie électrique. Nous continuerons à avoir des installations électriques semblables, dans l'ensemble, aux usines qui emploient actuellement des combustibles classiques, et elles seront munies, dans une grande mesure, du même genre d'équipement que celui dont on se sert à présent. Il est peu vraisemblable, à notre avis, qu'on estime pratique et rentable de multiplier les petites usines d'énergie électrique, situées à proximité des centres de consommation. Nous devons donc conserver notre système actuel de centrales et entretenir le réseau de transport et de distribution exactement comme nous le faisons à présent pour fournir l'énergie aux consommateurs. Ces installations de transport et de distribution coûtent à peu près le double de ce que coûte l'usine génératrice elle-même.

Si la plupart des experts s'accordent à penser que des méthodes de production d'énergie rentable peuvent se développer à partir de l'énergie nucléaire au cours des dix prochaines années, le coût réel de l'énergie ainsi produite est encore matière à spéculation. Comme on l'a dit déjà, les grandes piles actuellement prévues ou en cours de construction aux États-Unis sont des piles expérimentales et on escompte généralement que le courant qu'elles produiront coûtera davantage que le courant produit par les méthodes classiques. On estime possible que la seconde ou la troisième génération de piles — grâce en quelque sorte à l'expérience « interne », si l'on peut dire, ainsi acquise — seront capables de produire du courant à un prix suffisamment bas pour que l'on trouve intérêt à les utiliser sur une base purement commerciale. Ces piles sont déjà à l'étude.

Il convient également de noter que la plupart des piles dont on projette la construction pour produire de l'énergie sont beaucoup plus grandes que celles dont on aura besoin dans bien des cas, beaucoup plus grande aussi que celles qu'exigeraient actuellement les besoins locaux d'énergie. Les quatre piles proposées pour le programme expérimental de génératrices nucléaires de la Commission de l'énergie atomique des États-Unis d'Amérique, par exemple, ont une puissance électrique de 100 000 à 200 000 kilowatts. Leur puissance a été choisie telle parce que les grandes centrales s'adaptent mieux à la plupart des réseaux existants et qu'elles semblent avoir plus de chances de soutenir la concurrence des anciennes installations.

Les recherches en matière de génératrices d'énergie de plus petite dimension — d'une capacité allant de 1 000 à 25 000 kW d'électricité — sont

également très actives, mais on ne construit guère aux États-Unis de piles expérimentales de cette catégorie. Il est donc difficile d'évaluer dès à présent les qualités de rentabilité de ce genre d'installations.

En général, l'étude des conditions économiques semble indiquer que les usines d'énergie nucléaire, lorsqu'elles en arriveront au stade pratique, serviront surtout à compléter la capacité des génératrices électriques existantes pour faire face à l'accroissement de la charge. Il est extrêmement improbable qu'on désaffecte les usines existantes et qui fonctionnent bien; ou, si on le fait, il s'agira d'un nombre insignifiant d'installations. Tout porte à croire que la plupart des usines classiques resteront en service tant que leur équipement sera en mesure de fonctionner.

Tout paraît indiquer aussi qu'aux États-Unis, sauf dans le cas où des usines nucléaires seraient construites en vue de travaux expérimentaux, l'énergie nucléaire ne représentera pas, avant 25 ans au moins, un facteur majeur de production d'énergie. L'emploi de l'énergie est si considérable, aux États-Unis, qu'il serait matériellement impossible de poursuivre les expériences entreprises et de construire en même temps assez de centrales pour faire face à une proportion importante de la totalité des besoins. Mais si les programmes actuels donnent de bons résultats, il est possible et probable que l'énergie nucléaire deviendra avant 50 ans un élément extrêmement important de la production d'énergie.

Ailleurs qu'aux États-Unis, les aspects économiques du problème de l'énergie nucléaire se présentent tout différemment. En raison de l'inégalité dans la répartition des ressources d'énergie et de nombreux facteurs d'ordre économique, social et politique, ce sont les conditions particulières propres aux diverses *sources* d'énergie qui limitent l'emploi de l'électricité beaucoup plus que son *coût*. En Grande-Bretagne, par exemple, où les gisements de charbon sont pourtant relativement importants, des centrales atomiques sont déjà en voie de construction et leur exploitation est organisée, en partie à cause des difficultés qu'on éprouve à maintenir l'extraction du charbon à un rythme qui réponde aux besoins accrus d'énergie électrique.

Ces conditions se rencontrent également dans d'autres parties du monde, et leur présence pourrait hâter l'exploitation généralisée de l'énergie nucléaire. Il n'en est pas moins difficile d'imaginer comment on pourrait, au cours des vingt-cinq années à venir, construire assez de centrales pour que l'énergie nucléaire puisse jouer un rôle majeur dans la production de l'énergie mondiale. Il semble bien qu'un délai de 50 ans soit nécessaire pour que l'énergie nucléaire puisse satisfaire aux demandes encore plus importantes qui seront sans doute alors celles du monde entier. Car la somme de tous ces besoins sera sans doute très considérable.

CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉCONOMIE DANS LES DIVERS PAYS ET POSSIBILITÉS D'EMPLOI DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Les caractéristiques de l'économie dans les différents pays du monde et ses possibilités d'adaptation à l'emploi de l'énergie électrique comptent parmi les facteurs les plus importants lorsqu'il s'agit de déterminer le rôle de l'énergie nucléaire dans les années à venir. Là où, dans l'ensemble, l'emploi de l'énergie électrique continue à n'être pas très répandu, il est probable que l'avènement de l'énergie nucléaire n'aura pas d'effets très sensibles. Là où, au contraire, l'emploi de l'électricité est susceptible d'un développement considérable, l'énergie nucléaire peut devenir un facteur véritablement important de ce développement.

La plupart des grands pays dont l'économie, déjà très avancée, est en expansion, possèdent des réseaux d'énergie électrique considérables et bien développés. Dans ces pays, les perspectives d'augmentation de l'emploi de l'électricité sont déjà connues et il n'y a pas lieu de penser que la mise en service des génératrices nucléaires doive les modifier sensiblement. L'énergie nucléaire serait plutôt employée pour compléter les ressources d'énergie actuelles et donnerait l'assurance qu'il sera possible de satisfaire à l'accroissement de la demande.

Aux États-Unis, ainsi que dans beaucoup d'autres parties du monde, l'emploi de l'électricité passe du simple au double à peu près tous les dix ou douze ans. On estime en général que les ressources en combustibles sont suffisantes pour permettre de maintenir ce rythme pendant bien des années à venir, mais le coût de ces combustibles augmentera certainement. Lorsque les piles nucléaires seront en mesure de concurrencer avec succès, économiquement parlant, les installations qui utilisent les combustibles classiques, on peut s'attendre à voir les installations atomiques remplacer petit à petit les usines alimentées par les combustibles fossiles.

En 1954, le Comité d'enquête sur l'énergie électrique de l'Institut d'électricité Edison, dans un document intitulé *Looking Ahead to the Last Quarter of the First Century of Electric Power in the United States*, indiquait qu'en 1975 les États-Unis emploieraient sans doute de 40 à 65 millions de kilowatts produits par des piles nucléaires. Si ces chiffres paraissent considérables, rappelons que la capacité totale prévue pour faire face aux besoins du pays à cette époque serait de 300 à 425 millions de kilowatts. On ne s'est pas encore préoccupé sérieusement d'évaluer les besoins au-delà de cette date.

Certaines régions — telles que le Royaume-Uni, les Pays-Bas et le Danemark — sont déjà bien électrifiées, mais elles ne disposent pas de ressources d'énergie aisément disponibles pour compléter leur production:

Dans de telles conditions, la nécessité d'employer des combustibles nucléaires sera beaucoup plus forte. Il se peut qu'avant 25 ans des piles nucléaires fournissent une proportion importante de l'énergie électrique de ces pays, et que, dans 50 ans, elles en fournissent la majeure partie.

Les régions qui ne possèdent pas encore de réseaux d'énergie électrique bien développés sont celles où il est le plus difficile d'évaluer par avance le rôle éventuel de l'énergie nucléaire. Il n'existe aujourd'hui que peu de régions qui ne puissent être approvisionnées d'énergie électrique à un prix relativement abordable. Des considérations étrangères aux problèmes de ressources d'énergie sont à la base de la pénurie dont elles souffrent actuellement. Nous l'avons dit, beaucoup d'autres facteurs — d'ordre financier, économique et politique — entrent en jeu.

S'il est vrai que l'énergie nucléaire puisse supprimer efficacement les obstacles que crée l'absence de ressources disponibles, elle n'assurera pas pour autant un développement immédiat et considérable de l'emploi de l'énergie électrique dans les pays moins industrialisés. Le niveau élevé de la consommation dans les pays les plus avancés a été atteint par un progrès lent mais continu au cours des 75 dernières années. Ce développement est né des conditions économiques existantes qui, dans ces pays, ont encouragé l'usage toujours plus considérable de l'électricité.

Nombreux sont les pays où l'énergie nucléaire rendrait les plus grands services mais où, jusqu'ici, les conditions économiques ne sont pas aussi favorables. Dans ces pays, des changements immenses doivent s'opérer avant que les conditions économiques ne puissent s'adapter à un emploi très répandu et très abondant de l'énergie électrique.

La découverte de l'énergie atomique a enflammé l'imagination des hommes plus vivement peut-être que toute autre découverte dans l'histoire. Elle a engendré l'espoir universel de voir s'améliorer considérablement le sort de l'humanité. Cet immense espoir est, en lui-même, des plus encourageants et peut être de nature à hâter les progrès d'ordre social, politique et économique qui nous conduiront vers ce monde meilleur, souhaité avec tant de ferveur. C'est là un noble objectif.

L'énergie nucléaire ne saurait, en soi, nous apporter ces progrès indispensables; mais il se pourrait bien qu'elle fût un des facteurs les plus importants de la réalisation de ce progrès social. C'est une preuve de plus du rôle très important que l'énergie nucléaire peut jouer dans les 25 ou 50 années à venir. Elle doit être considérée comme un élément actif du développement de l'économie générale de chaque pays et même, là où des échanges d'énergie sont réalisables, de l'économie des pays limitrophes, comme, par exemple, dans le cas des pays de l'Europe occidentale, où les réseaux sont déjà étroitement interdépendants.

PROBLÈMES DE FINANCEMENT QUE POSE L'ÉQUIPEMENT DES ENTREPRISES DE FOURNITURE D'ÉNERGIE

Pour que l'énergie nucléaire puisse servir un jour à améliorer les conditions de vie dans le monde entier, il faudra d'abord résoudre de formidables problèmes d'ordre financier.

L'un des plus malaisés de ces problèmes, auquel bien des pays ont à faire face pour produire de l'électricité, c'est d'obtenir les fonds nécessaires à la construction des centrales et à l'établissement de réseaux. Dans plusieurs pays, au cours des dix dernières années, des programmes d'un intérêt urgent ont été réduits à néant, faute de capitaux. Dans la plupart des cas, des investissements étrangers sont indispensables, mais les arrangements nécessaires ont été extrêmement difficiles à conclure. Il semble que la difficulté majeure réside dans un sentiment nationaliste puissant tendant à faire considérer comme une « exploitation » le paiement équitable des intérêts des capitaux investis. Il est probable que des fonds pourraient être trouvés si l'on était suffisamment assuré de la sécurité de ces investissements.

Situation des plus difficiles, pour laquelle jusqu'à présent aucune solution satisfaisante ne se dégage. Comme les centrales productrices d'énergie nucléaire exigeront des investissements relativement élevés, le problème n'en est que plus grave et risque de restreindre le rôle de cette énergie. Quoi qu'il en soit, il constitue assurément un facteur limitatif dans l'évaluation du rôle de l'énergie nucléaire au cours des années à venir.

CONCLUSION

En résumé, nous avons montré le lien étroit qui rattache l'utilisation de l'énergie au progrès et au bien-être de l'humanité. Nous avons évoqué cette grande attente d'un monde meilleur, plus pacifique et plus prospère, ce nouvel espoir pour l'humanité, né de la découverte scientifique de la fission nucléaire. Et, nous l'avons vu, la réalisation de cette bienfaisante espérance est très étroitement unie au développement de l'énergie atomique comme source thermique pratiquement utilisable pour la production de l'énergie électrique.

Nous avons reconnu que l'énergie nucléaire est virtuellement assurée d'un rôle dominant en tant que source d'énergie et comme facteur déterminant du niveau de vie dans le monde entier.

Nous avons tenté de lire dans l'avenir et de discerner, si faiblement que ce soit, les divers stades de l'avènement de l'influence universelle de l'énergie atomique. Voici ce qu'il paraît raisonnable d'espérer : 1) dans 10 ans, mise au point des moyens d'utilisation rentable de l'énergie nucléaire; 2) dans 25 ans, utilisation plus étendue, permettant de fournir une certaine proportion, faible encore, de la totalité de l'énergie électrique employée;

3) dans 50 ans, utilisation plus complète, permettant de satisfaire en grande partie les nouveaux besoins d'énergie électrique.

Nous avons examiné également les facteurs qui limitent le développement de l'énergie atomique et risquent de restreindre son rôle futur.

Que peut-on faire à ce sujet?

Certains de ces facteurs, tels que ceux qui concernent l'économie locale des pays intéressés, semblent n'être restrictifs que dans le présent. D'autres facteurs — d'ordre technique ou financier, ou relatifs aux sources de combustible nucléaire — peuvent sans doute être modifiés. Par des efforts acharnés et par l'étude approfondie de ceux de ces facteurs dont l'action limitative peut être éliminée, nous hâterons l'avènement de l'énergie nucléaire au rôle primordial qu'elle doit finalement jouer.

A mes yeux, l'aspect le plus encourageant de toute la question de l'énergie atomique consiste dans le fait qu'elle ait stimulé tant de recherches nouvelles.

L'esprit humain, cet incomparable laboratoire de recherche, travaille inlassablement chez nombre d'individus et dans de nombreux pays. La présente Conférence démontre excellemment la valeur de telles rencontres, où des chercheurs mettent en commun le résultat de leurs efforts. Je suis sincèrement convaincu que c'est dans une entreprise commune de cette sorte que reposent les meilleurs espoirs de voir l'énergie nucléaire jouer le rôle qui doit finalement être le sien, et qui est le plus important : servir par des voies pacifiques à l'amélioration de l'humanité tout entière. La tâche est immense; la récompense le sera plus encore.

Rôle des centrales électronucléaires* de puissance moyenne dans le développement futur de la civilisation, et leurs possibilités d'emploi en Uruguay

par W. S. Hill et G. E. Villar **

ROLE DES CENTRALES ÉLECTRONUCLÉAIRES DE PUISSANCE MOYENNE

Les centrales électronucléaires de puissance moyenne pourront prendre dans l'avenir une importance réelle dans les domaines suivants :

a) Production d'énergie électrique dans les régions dépourvues de ressources hydrauliques où l'on ne peut produire de grandes quantités d'énergie thermoélectrique, à cause des difficultés ou de l'impossibilité de l'approvisionnement en combustibles.

b) Production d'énergie électrique dans des régions où les ressources hydrauliques sont insuffisantes, le prix de revient des combustibles élevé, et où le développement industriel ou urbain ne justifie pas l'installation de centrales atomiques de grande puissance.

c) Production d'énergie électrique dans des régions dépourvues de ressources hydrauliques, éloignées des centres producteurs d'énergie, et où le prix élevé du transport de l'énergie ou des combustibles justifie l'installation de centrales électronucléaires pour répondre aux besoins locaux.

d) Production d'isotopes radioactifs pour les besoins médicaux et techniques, et utilisation possible de certaines parties de la pile, ou de ses installations auxiliaires, pour des recherches scientifiques ou techniques sur les effets des rayonnements sur la matière.

Dans les régions polaires ou désertiques, et dans de nombreuses zones montagneuses d'accès difficile pour les combustibles et pauvres en ressources hydroélectriques, on pourrait fort bien, et ce serait là une première étape, installer de petites centrales équipées de piles atomiques, dont la puissance, selon les cas, varierait de 5 000 à 50 000 kW.

L'utilisation de l'énergie électrique, dans des régions où elle n'a pas pénétré jusqu'ici, entraînerait un changement important des conditions de vie et rendrait possible l'exploitation des ressources naturelles. On verrait alors se créer des centres urbains et industriels qui prépareraient la voie à l'installation de centrales atomiques de puissance moyenne, et ce serait la seconde étape de l'expansion économique de la région.

Il convient de noter que ce développement sera encore intensifié grâce aux facilités que l'utilisation des combustibles nucléaires procurera aux transports aériens, les avions n'ayant plus besoin de s'approvisionner loin de leurs bases.

Les centrales électronucléaires de puissance moyenne semblent apporter sur le plan technique la solution la meilleure au problème de la fourniture d'énergie électrique aux régions dont la densité démographique est relativement faible et où le développement industriel est limité en raison

---

Original : espagnol.

* Définition : Dans le présent mémoire, nous considérons comme « centrales électronucléaires de puissance moyenne » celles dont la puissance est située entre 40 000 et 100 000 kW. Le cycle qui engendrera l'énergie de ces centrales comportera l'échange de chaleur entre la pile et le dispositif générateur de vapeur qui alimente les turbo-générateurs. Ces centrales ne récupéreront pas les matières irradiées dans la pile; ces matières seront conservées d'une manière adéquate pendant un laps de temps relativement grand, après quoi on les remettra à des usines de récupération des matières fissiles, qui pourraient faire partie des centrales de production de combustible nucléaire.

Les centrales génératrices d'énergie dont nous venons d'indiquer les caractéristiques seront d'un emploi de plus en plus courant à travers le monde. Elles seront particulièrement intéressantes pour l'Uruguay où elles permettront de résoudre rapidement et économiquement le problème de l'électrification des régions nord-est et sud-est du pays, qui, dans le programme d'électrification en cours, se trouvent défavorisées; en effet, ces régions sont très éloignées des installations hydroélectriques et des centrales thermiques qui alimentent la ville de Montevideo et sa zone d'influence.

** Le présent mémoire a été rédigé à la demande du Conseil national du Gouvernement par Walter S. Hill, Directeur de l'Institut de physique de la Facultad de Ingeneria y Agrimensura, et par German E. Villar, Directeur de l'Institut de technologie et de chimie de la même Faculté. Ils ont effectué ce travail en collaboration étroite avec les techniciens de l'Administration générale des usines électriques et des téléphones de l'État.

du prix élevé de l'énergie. Il existe de par le monde de vastes régions qui présentent ces caractéristiques. Des centrales électronucléaires de moyenne importance, réparties judicieusement, pourront apporter une solution rationnelle au problème de l'alimentation en énergie. Cette solution est préférable à celle qui consiste à centraliser la production dans des usines de grande puissance qui, si elles permettent effectivement de réduire le prix de revient du kilowattheure, renchérissent le prix de l'énergie distribuée dès qu'il faut envisager son transport sur de longues distances.

LE RAVITAILLEMENT EN COMBUSTIBLES DES CENTRALES ÉLECTRONUCLÉAIRES DE PUISSANCE MOYENNE

En admettant que les centrales électronucléaires soient équipées de piles autorégénératrices, utilisant l'uranium naturel, et que leur rendement soit de 50 pour cent, chaque kilogramme d'uranium consommé donnera 8 350 millions de calories qui produiront 3 300 000 kWh, en supposant une consommation de 2 500 calories pour la production d'un kilowattheure.

Si l'on admet, pour ces centrales, un taux d'utilisation de 50 pour cent, elles produiront annuellement 4 400 kWh par kilowatt de puissance installée. Par conséquent, la consommation annuelle de combustible des centrales de puissance moyenne pourrait osciller entre 55 et 135 kilogrammes d'uranium.

Leur faible consommation de combustible facilitera, non seulement la constitution de réserves pour plusieurs années, mais encore le transport du combustible, même si l'accès aux centrales électronucléaires ne peut avoir lieu que par la voie aérienne.

Grâce au rendement technique élevé des combustibles nucléaires, leur transport par voie aérienne n'influera pas sensiblement sur le prix de revient du kilowattheure. D'autre part, une abondante réserve de combustible évitera, dans les centrales électronucléaires, les graves interruptions de fonctionnement qui, de temps en temps, surviennent dans les centrales thermiques lorsque les stocks de combustibles sont épuisés.

LA RÉGÉNÉRATION DU COMBUSTIBLE UTILISÉ DANS LES PILES NUCLÉAIRES

En raison de la faible consommation annuelle de combustible dans les centrales électronucléaires de puissance moyenne, il ne conviendrait pas, pour des raisons d'économie, de le régénérer dans les centrales mêmes. Il serait préférable d'entreposer assez longtemps les combustibles utilisés, puis de les envoyer aux usines de récupération de matières fissiles, qui pourraient faire partie des usines productrices de combustible nucléaire.

La régénération des combustibles épuisés dans les usines productrices de matières fissiles faciliterait considérablement le contrôle de l'utilisation de l'uranium, pour autant qu'il conservera à l'avenir son actuel intérêt militaire.

LES CENTRALES ÉLECTRONUCLÉAIRES DE PUISSANCE MOYENNE JOUERONT UN ROLE IMPORTANT DANS LE DÉVELOPPEMENT DE L'UTILISATION DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE A DES FINS PACIFIQUES

Parmi les caractéristiques propres aux centrales électronucléaires de puissance moyenne, il faut souligner les suivantes : *a*) facilité d'intallation et de transport ; *b*) facilité d'approvisionnement en combustibles nucléaires; *c*) facilité de régénération des combustibles utilisés; *d*) facilité du contrôle de l'utilisation des matières fissiles; *e*) frais d'installation réduits, par rapport à ceux des grandes centrales atomiques.

Ces caractéristiques et le fait que de nombreuses régions du monde ont besoin de quantités relativement faibles d'énergie, conduisent à affirmer qu'il se produira, au cours de la première étape de l'application de l'énergie atomique, une grande demande de centrales nucléaires de moyenne importance.

Il faut ajouter, à l'appui de cette affirmation, que dans de nombreux pays où l'énergie électronucléaire a de grandes chances d'être utilisée sur une vaste échelle, il existe également de nombreuses possibilités d'installer des centrales nucléaires de puissance moyenne. Il est en effet logique de prévoir qu'en de nombreux cas on installera en premier lieu ce genre de centrale, pour les raisons indiquées plus haut; ces centrales constitueront également un excellent moyen d'acquérir une expérience directe de la production de l'énergie nucléaire, et de former le personnel technique et ouvrier que l'on pourra ensuite affecter à l'installation et à l'exploitation des grandes centrales.

La conclusion évidente est que les centrales électronucléaires de puissance moyenne joueront un rôle très important dans la diffusion de l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques.

LES POSSIBILITÉS D'INSTALLER DES CENTRALES ÉLECTRONUCLÉAIRES DE MOYENNE PUISSANCE EN URUGUAY

Le plan d'alimentation de l'Uruguay en énergie électrique est actuellement basé sur l'aménagement hydroélectrique du rio Negro, l'exploitation de l'énergie hydraulique du rio Uruguay en commun avec la République Argentine, et la production d'énergie thermoélectrique dans les centrales de Montevideo.

L'exploitation de l'énergie atomique conduira le pays à adopter un plan mixte de production d'énergie : hydraulique, thermique et nucléaire, et l'on peut d'ores et déjà prévoir que la production d'énergie nucléaire prendra une importance croissante.

Si la réalisation du programme actuel de production d'énergie est menée à bien, on prévoit qu'en 1983 la consommation absorbera la totalité de la puissance installée des centrales thermiques actuelles et de toutes les centrales hydroélectriques que l'on pourrait construire pour exploiter à fond les ressources hydrauliques de l'Uruguay. Il est donc évident que les nouvelles sources d'énergie, nécessaires pour répondre à l'augmentation ultérieure de la consommation, devront entrer en exploitation en 1983. Il faudra par conséquent, bien avant cette date, décider de quelle manière on obtiendra cette production supplémentaire d'énergie.

Tout laisse supposer que lors de l'installation des premières centrales nucléaires en Uruguay, on donnera la préférence aux centrales de puissance moyenne. Il semble en effet que deux centrales de 100 000 kW chacune suffiront à alimenter les régions nord-est et sud-est de l'Uruguay. Ces régions sont caractérisées par une densité de population relativement faible, et par leur éloignement des actuelles centrales hydroélectriques et thermiques.

La seconde étape de l'utilisation de l'énergie atomique en Uruguay devrait augmenter l'approvisionnement en énergie de la capitale et de ses environs; il faudrait alors construire de grandes centrales atomiques d'une puissance minimum d'environ 300 000 kilowatts. L'expérience acquise par l'exploitation des centrales de puissances moyenne se révélera précieuse lorsqu'il s'agira de projeter et de réaliser de grandes centrales atomiques et d'en former le personnel technique et auxiliaire.

Vu les frais d'installation élevés des centrales hydroélectriques en Uruguay, et les prix de revient de plus en plus intéressants de l'énergie électronucléaire, on avancera peut-être la date d'utilisation de l'énergie atomique en Uruguay, en raison des avantages économiques qu'elle présentera par rapport à l'énergie hydroélectrique.

L'établissement dans le sud-est du pays d'une centrale atomique influencerait de façon décisive le développement de certaines industries locales, comme celle des alcalis et du chlore électrolytique, qui pourraient compléter l'industrie du sel marin actuellement en voie d'implantation.

Au cours de la seconde étape du développement de l'utilisation de l'énergie atomique en Uruguay, l'installation d'une nouvelle centrale de puissance moyenne semble fort probable, qui alimentera la région nord-est. En même temps, grâce à l'expérience qu'aura permis d'acquérir l'exploitation de la centrale du sud-est, on pourra envisager d'alimenter en énergie atomique une partie du réseau, alimentée jusqu'alors par les centrales thermiques de Montevideo.

ROLE DES CENTRALES ÉLECTRONUCLÉAIRES DE PUISSANCE MOYENNE DANS LE DÉVELOPPEMENT FUTUR DE LA CIVILISATION

Ces considérations mettent en valeur le rôle considérable de l'énergie atomique dans les progrès futurs de l'humanité.

Les grandes centrales atomiques auront, sur les centrales thermiques, les avantages suivants : il sera possible à tout moment de disposer d'un stock important de combustibles, on pourra réduire considérablement la consommation des combustibles classiques dont les réserves, surtout dans le cas du pétrole, sont limitées; enfin, outre que l'énergie sera produite à un prix moins élevé, ces centrales offriront un gros intérêt stratégique.

Les centrales atomiques de puissance moyenne présenteront les mêmes avantages que les grandes, et présenteront en outre des avantages particuliers constituant un facteur fondamental de progrès dans de nombreuses régions du monde où la production d'énergie est actuellement, soit impossible en raison des difficultés de transport des combustibles, soit limitée en raison du prix élevé de ces combustibles.

Les facilités qu'offriront les centrales électronucléaires et le transport des combustibles qui leur sont nécessaires ne permettront pas seulement d'améliorer considérablement les conditions de vie dans ces régions, mais rendront également possible l'exploitation de leurs ressources naturelles, ce qui n'était pas encore possible faute d'énergie.

Ce sera sans doute là le plus important des nombreux bienfaits que l'on est en droit d'attendre de l'utilisation de l'énergie atomique.

CONCLUSIONS

Les conclusions qui précèdent font ressortir les avantages que présenteront les centrales atomiques de puissance moyenne. Il nous faut souligner ici leur faible consommation de matières fissiles, qui permettra d'assurer, avec une facilité relative, leur ravitaillement en combustibles nucléaires et le contrôle de leur utilisation. Ce contrôle restera indispensable tant que ces combustibles présenteront un intérêt militaire.

D'autre part, grâce à l'installation de petites centrales électronucléaires judicieusement réparties, le prix de l'énergie distribuée tendra à diminuer, et c'est là également un facteur favorable à leur implantation.

On peut donc prévoir qu'au cours de la première étape de l'utilisation de l'énergie électronucléaire il se produira une forte demande de centrales atomiques de puissance moyenne, ce qui, du point de vue économique comme dans l'intérêt de l'humanité, justifie que l'on accorde la préférence à leur mise au point.

En ce qui concerne l'Uruguay, tout laisse supposer que les premières centrales atomiques seront de moyenne puissance. L'expérience que leur exploitation permettra d'acquérir, servira de base à l'établissement du programme futur de ravitaillement du pays en énergie par un réseau mixte de centrales hydrauliques, atomiques et thermiques. L'exploitation de ce réseau sera exempte d'un grand nombre des inconvénients de la production d'énergie exclusivement thermoélectrique, dus au fait que dans certaines circonstances, le ravitaillement en combustibles étrangers se trouvait dangereusement réduit.

Compte rendu de la séance 5

Mercredi 10 août 1955 (matin)

Président : M. D. V. Skobeltsyne (U.R.S.S.)
Secrétaires scientifiques : MM. D. Littler et B. Prakash

PROGRAMME

P/893	Quelques considérations sur l'emploi de l'énergie nucléaire pour le développement économique des pays sous-développés	Département des affaires économiques et sociales, ONU
P/11	Prévisions économiques du rôle de l'énergie électronucléaire au Canada	J. Davis et W. B. Lewis
P/327	Intégration de l'énergie nucléaire parmi les moyens de production de l'énergie en France	P. Ailleret et P. Taranger
P/758	Rôle comparé de l'énergie nucléaire et des autres sources d'énergie	J. M. Kay
P/145	Importance de l'énergie nucléaire pour l'économie du Brésil	B. C. de Mattos et J. C. Ribeiro
P/1002	Rôle de l'énergie électronucléaire dans la République Argentine	P. E. Iraolagoitía
P/475	Les possibilités économiques de l'énergie d'origine nucléaire	K. M. Mayer
P/389	Contribution de l'énergie d'origine nucléaire aux ressources énergétiques du Royaume-Uni et du monde jusqu'en 1975	J. D. Cockcroft
	Discussion	

Le PRÉSIDENT : Nous voici parvenus au stade de nos travaux où nous allons considérer l'avenir de l'énergie nucléaire. La présente séance a pour thème le rôle de l'énergie nucléaire dans les cinquante années à venir. En fait, toute la Conférence est consacrée à l'avenir. L'avenir, les perspectives qui s'ouvrent devant nous, ont déjà été évoqués aux séances précédentes. C'était là le point de départ de notre Conférence. Toutefois, jusqu'ici notre attention s'est portée plutôt sur l'aspect négatif de la question. A l'une des premières séances, nous avons cherché à déterminer dans quelle mesure l'expansion de l'économie mondiale pouvait, à longue échéance, se trouver entravée par l'insuffisance des ressources dont l'humanité a disposé jusqu'ici. On a envisagé les besoins futurs, et il faut reconnaître que, déjà sur ce point, les évaluations ont été très différentes.

Nous allons à présent entendre une série d'exposés concernant les tentatives faites pour présenter un tableau du développement de l'énergie d'origine nucléaire, ou du moins pour analyser les différentes façons d'aborder le problème. Pour ces études, nous avons déjà pu nous fonder en partie sur les données qui ont fait l'objet des séances précédentes. Par exemple, nous avons entendu hier un exposé sur une centrale atomique exploitée en Union soviétique, et un autre sur un prototype de génératrice nucléaire aux États-Unis d'Amérique.

C'est encore plus les questions relatives à la technique, laquelle fournit la base de nos prévisions, que nous examinerons au cours de nos travaux ultérieurs. Toutefois, il ne faut guère s'attendre que nous soyons en mesure de parvenir à des prévisions entièrement fondées et précises, car il est apparemment encore trop tôt pour cela.

Nous sommes saisis à la présente séance d'une série d'études diverses et fort intéressantes qui, à un degré variable — et parfois considérable — se fondent sur des hypothèses. Nous allons maintenant entendre ces communications.

La parole est à M. de Breuvery, qui va parler des possibilités d'application de l'énergie nucléaire dans les pays sous-développés.

Le R. P. DE BREUVERY (Organisation des Nations Unies) présente le mémoire P/893.

M. J. DAVIS (Canada) présente le mémoire P/11.

M. AILLERET (France) présente le mémoire P/327 et ajoute les observations ci-après. Une première petite centrale de 5 000 kW est en construction, qui récupérera une partie de la chaleur sortant de la pile G 1, décrite dans une autre communication, c'est-à-dire d'une pile à uranium naturel et graphite refroidie à l'air atmosphérique. Mais il ne s'agit là que d'une récupération et non pas d'une vraie production d'énergie, car les soufflantes de la pile consommeront un peu plus que la production de la petite centrale. Par contre, l'Électricité de France est associée au Commissariat à l'énergie atomique pour la construction de G 2, c'est-à-dire d'une pile qui sera également décrite dans une autre communication et qui donnera environ 30 000 kW électriques nets. Cette pile, dont la construction est commencée et qui fonctionnera dans deux ans, est aussi à uranium naturel et graphite, mais refroidie à l'acide carbonique sous pression. Enfin, une pile EDF I, toujours à uranium naturel et refroidie au gaz carbonique, est à l'étude; elle fournira environ 60 000 kW électriques à la fin de 1959 et constituera la première véritable unité de production d'énergie nucléaire de l'Électricité de France.

Nous avons aussi fait démarrer une filière de piles à uranium naturel et graphite que nous pensons poursuivre sous la forme d'une série d'unités successives, chacune étant plus puissante que la précédente et fonctionnant à une température plus élevée. Quand le moment sera venu d'amplifier la part de l'énergie atomique dans la production totale d'énergie électrique, il nous sera facile de faire des duplicata des unités suivantes et d'entrer dans la phase quantitative où nous ferons à chaque fois plusieurs unités identiques. Pour le moment, nous sommes dans la phase qualitative où nous faisons des prototypes successifs qui visent à la fois trois objectifs : ils fourniront de l'énergie, ils fourniront du plutonium, ils fourniront aussi des informations. Naturellement, toutes ces unités travailleront en parallèle sur le réseau national, qui est d'ailleurs lui-même en parallèle avec plusieurs pays d'Europe occidentale, notamment la Suisse, l'Allemagne de l'Ouest et la Belgique. Bien entendu, ces centrales fonctionneront en base et constamment à leur puissance maximum normale. Des dispositifs de shuntage de la turbine ont même été prévus pour le cas où, en période de très forte hydraulicité par exemple, ou par suite d'accidents de lignes électriques, on n'aurait pas l'usage de la production d'énergie électrique. Il faudrait alors continuer à faire marcher la pile à plein pour en tirer à la fois le maximum de plutonium et d'informations. Mais il n'en sera pas toujours ainsi.

M. KAY (Royaume-Uni) présente le mémoire P/758.

M. DE MATTOS (Brésil) présente comme suit le mémoire P/145 : Abandonnant au passé une phase d'économie purement agricole, le Brésil a commencé une évolution rapide vers une ère industrielle. L'établissement d'industries lourdes, telles que les aciéries de Volta Redonda et Manesmann à Belo Horizonte et les industries de l'aluminium à la ville d'Aluminium, et les projets encore plus nombreux d'installations d'industries, exigent comme corollaires une grande consommation d'énergie.

Car s'il est vrai que la rapidité du développement industriel que notre pays a acquis a été rarement égalée par d'autres nations, il n'en est pas moins évident que l'insuffisance des sources d'énergie dans les régions côtières met malheureusement un frein à cette fièvre de développement.

C'est en effet dans ces régions du littoral, où la population s'est concentrée intensément et où les conditions orographiques ont favorisé les voies de communication et les moyens modernes de transport, que s'est installée la plus grande partie du parc industriel du pays, élevant ainsi le standard de vie des habitants.

Bien que l'hydrographie du Brésil fasse de notre pays l'un des plus favorisés du monde au point de vue du potentiel hydroélectrique, ses conditions orographiques rendent difficile et même, dans certains cas, anti-économique, leur installation à une échelle qui permette de satisfaire les besoins d'énergie imposés par le rythme de son développement industriel. C'est ainsi que dans le voisinage de Rio de Janeiro et de Sao Paulo, il n'y a presque plus de ressources hydroélectriques susceptibles d'être facilement exploitées pour satisfaire la demande croissante d'énergie, ce qui a obligé à remédier à cette insuffisance par l'installation d'usines thermoélectriques.

Une solution au problème que nous venons de poser pourrait être trouvée dans le déplacement de l'industrie lourde et dans la création de centres industriels dans les zones situées à proximité de sources hydrauliques abondantes, si cela n'entraînait pas pratiquement un déplacement de près de 1 000 km vers l'intérieur des terres. Ceci reviendrait, en effet, à remplacer le problème primitif par

de nouveaux obstacles tout aussi difficiles à surmonter et dont le plus évident serait la nécessité d'établir des moyens de communication à travers des régions montagneuses parfois non accessibles, tant pour le transport des matières premières que pour l'écoulement des produits fabriqués vers les centres de grande consommation, c'est-à-dire vers ces mêmes villes et régions côtières. Il convient de remarquer que même si, malgré ces difficultés, une telle solution venait à être adoptée, une analyse des disponibilités hydroélectriques du pays fait ressortir que, dans n'importe quelle hypothèse, l'énergie disponible par habitant ne dépasserait pas 1/25 de celle qui est consommée actuellement aux États-Unis d'Amérique.

Le rythme extrêmement accéléré auquel s'effectue le développement de notre pays, avec la mise en valeur de toutes ses ressources et de toutes ses richesses potentielles, dans une phase de transition entre une économie de base agricole et une économie de plus en plus industrialisée, a posé pour le gouvernement et les milieux techniques responsables le problème fondamental de nos ressources d'énergie disponibles et de leur utilisation.

Dans ce domaine, nos ressources connues les plus considérables se trouvent du côté de l'énergie hydraulique, puisqu'en la matière le Brésil occupe le quatrième rang dans le monde avec une réserve totale, facilement utilisable, de 16,5 millions de kilowatts.

Les courbes de croissance de l'utilisation de l'énergie électrique au Brésil sont un exemple frappant et très suggestif de la rapidité du développement de ce jeune pays.

La courbe d'évolution de la puissance électrique exploitée au Brésil présente trois régions caractérisées par des coefficients angulaires moyens qui augmentent progressivement et dans une forte proportion, malgré les facteurs restrictifs qui entravent ce développement, comme nous le verrons tout à l'heure.

Les accroissements annuels moyens de la puissance installée, mesurés en mégawatts par an, ont été jusqu'à présent les suivants :

De 1900 à 1902	17,2
De 1920 à 1948	43,4
De 1948 à 1954	203,6

On peut mentionner quatre causes principales responsables de l'accroissement remarquable de la demande d'énergie électrique au Brésil : 1) l'accélération de l'urbanisation; 2) l'augmentation de la population des villes; 3) le développement industriel; 4) la demande d'énergie de la part des populations rurales.

A côté de ces facteurs positifs, il ne faut pas oublier un facteur restrictif, à savoir le petit bénéfice des investissements de capital privé dans les industries électriques, dû au contrôle du gouvernement fédéral sur les tarifs de vente de l'énergie, ce qui a pour effet de diriger plutôt ces capitaux vers d'autres secteurs industriels plus rémunérateurs.

Si l'on considère maintenant, du point de vue de la distribution géographique, les réserves brésiliennes d'énergie hydraulique, on constate que les régions du pays les plus développées démographiquement et industriellement sont les régions de l'Est et du Sud, comprenant les États de Bahia, Minas, Espirito Santo, Rio de Janeiro, Sao Paulo, Parana, Santa Catarina et Rio Grande do Sul, avec une population globale de 36 millions d'habitants, ce qui représente à peu près 70 pour cent de la population du pays. Or, dans ces deux régions, le potentiel hydraulique est seulement de 9,7 millions de kilowatts facilement exploitables.

En extrapolant la courbe de croissance de la puissance installée, même dans l'hypothèse la plus conservatrice — c'est-à-dire si l'on admet que l'indice de croissance se maintiendra stationnaire à sa valeur actuelle — l'accroissement de la puissance installée dans les trente prochaines années sera de 7,1 millions de kilowatts ce qui, ajouté aux 2,8 millions de kilowatts actuels, totalisera près de 10 millions de kilowatts, épuisant ainsi et même dépassant le potentiel hydraulique disponible dans les régions de l'Est et du Sud du pays. Toutefois, d'après des données statistiques connues, le plus probable est que l'utilisation des réserves se fera à un rythme encore plus accéléré.

Il est vrai qu'avec des ouvrages de génie civil très considérables, comprenant notamment la transposition de bassins hydrographiques et l'installation de stations de pompage, on pourrait arriver à doubler approximativement la puissance hydraulique disponible; mais ces travaux auraient pour conséquence d'élever considérablement le prix de revient de l'énergie produite.

On doit donc s'attendre, même dans l'hypothèse la plus conservatrice, à ce qu'en l'espace de trente ans les principales sources d'énergie hydraulique dans les régions les plus peuplées et les plus industrialisées du Brésil auront déjà été utilisées. Il faut, par conséquent, envisager d'ores et déjà le problème de l'obtention de nouvelles sources d'énergie.

La grande étendue et les conditions orographiques du territoire brésilien rendent particulièrement difficiles les problèmes de transport et de distribution de l'énergie. En ce qui concerne l'énergie électrique, un rayon de 500 km autour de l'usine génératrice représente la limite approximative pour le transport économique de l'énergie. C'est d'ailleurs le cas pour la nouvelle usine de la compagnie hydroélectrique Hidroeletrica S. Francisco, la plus moderne de nos centrales hydroélectriques, qui possède deux lignes de transmission à 220 kW, l'une de 405 km de longueur pour alimenter les États du Nord-Est brésilien et l'autre de 457 km pour le transport de l'énergie de l'État de Bahia.

C'est également en raison des grandes distances à l'intérieur du Brésil qu'on ne peut songer sérieusement à l'utilisation intensive dans tout le pays du charbon produit dans les mines des États de

Santa Catarina et de Rio Grande do Sul. Le rendement de ces gisements n'est pas très important; la majeure partie du charbon produit doit subir un traitement préalable assez onéreux et, pour cette raison, son utilisation est limitée aux industries situées dans le voisinage des mines ou à l'alimentation des réseaux de chemin de fer des États du Sud.

En ce qui concerne le pétrole, les perspectives sont plus favorables. La récente découverte de champs pétrolifères dans le bassin amazonique, dans des conditions d'exploitation qui semblent très intéressantes, ouvre évidemment des horizons nouveaux au Brésil en matière de ressources énergétiques. Mais l'on ne dispose pas encore de données quantitatives qui nous permettent de faire une étude de la capacité et de la productivité de ces nouveaux gisements et, en conséquence, d'évaluer leur signification dans le cadre général de nos besoins en énergie.

On s'est livré aussi, dans le mémoire qui vous est présenté, à une analyse sommaire de la situation du Brésil au regard d'autres sources possibles d'énergie telles que, par exemple, l'énergie éolienne, l'énergie des marées, l'énergie solaire et l'énergie thermique des mers utilisable d'après le principe des usines Claude-Boucherot.

Mais, dans tous ces cas, les perspectives de réalisation pratique sont encore, soit très lointaines, soit tout à fait limitées à certaines régions ou à une production d'énergie de puissance relativement faible et, à moins que l'on n'assiste à de nouveaux et importants développements techniques, on ne peut pas fonder sur ces hypothèses la satisfaction des besoins énergétiques d'un pays comme le Brésil, en plein essor et en plein épanouissement. En outre, la solution apportée par la construction d'usines thermoélectriques soulèverait des problèmes économiques difficiles à résoudre, comme nous l'avons déjà vu à propos de nos ressources en charbon.

Resterait l'huile diesel à proposer comme combustible. Mais cette possibilité ne peut davantage être considérée dans un avenir immédiat, car la création des raffineries de pétrole au Brésil est encore trop récente pour se traduire par la production de tonnages suffisants. On pourrait remédier à cette difficulté en intensifiant les importations de combustible; mais ce procédé n'est guère à recommander du fait de l'évasion de devises qu'il entraînerait et qui viendrait ajouter aux difficultés déjà existantes celles de la concurrence industrielle sur le marché international. Enfin — ce n'est pas, hélas, le moindre aspect du problème — l'inconvénient le plus sérieux d'une telle solution ne résiderait-il pas dans la diminution ou la paralysie d'un grand nombre des activités du pays en cas de guerre, ainsi que nous l'avons déjà expérimenté si durement à l'occasion des deux derniers conflits ?

Le rôle de l'énergie atomique

Malgré les efforts considérables qui ont été faits pour le développement des industries brésiliennes du pétrole et du charbon, nous savons bien que, dans notre pays, la solution réelle du problème de la production d'énergie sur une grande échelle doit être trouvée par d'autres moyens. L'existence, au Brésil, d'importants gisements de minerais d'uranium et de thorium nous ouvre, en effet, d'immenses possibilités qui sont de nature à permettre, par l'utilisation de l'énergie atomique, de surmonter les difficultés que nous venons de passer en revue.

Bien que le pays ne possède pas d'expérience propre concernant le coût de l'installation de centrales électronucléaires, les données publiées dans la documentation internationale nous permettent d'admettre que, même dans les conditions actuelles, des centrales nucléaires installées au Brésil pourraient déjà entrer avantageusement en concurrence avec les centrales de type classique.

Un examen de la distribution de l'énergie électrique dans notre pays nous permet d'affirmer que, exception faite des régions voisines de Rio de Janeiro et de Sao Paulo, la majeure partie des autres États est alimentée en électricité à partir de petites centrales thermiques fournissant celle-ci à un prix de revient relativement élevé. A ce fait, il faut ajouter que l'exploitation de ces centrales oblige à importer des combustibles étrangers, ce qui entraîne tous les inconvénients que nous venons d'énumérer. Dans les installations thermoélectriques les plus modernes, comme celle de Piratininga, avec un facteur de charge de 50 pour cent, le prix du kilowattheure est de l'ordre de 0,025 dollar. Dans les installations hydroélectriques les plus modernes, comme celle de Paulo Afonso, le prix du kilowattheure peut être évalué à environ 0,018 dollar.

L'examen sommaire auquel nous venons de procéder nous autorise à conclure que, même dans les conditions actuelles, l'installation de centrales électronucléaires dans ces régions du pays les mettrait en position favorable par rapport à nos centrales thermiques et même, dans certains cas, par rapport à quelques-unes des centrales hydroélectriques déjà existantes, comme celle de Paulo Afonso. S'il est vrai, d'une part, que l'installation d'une industrie atomique au Brésil nécessiterait de grands investissements, il n'en est pas moins certain, d'autre part, que le coût de l'exploitation de ces usines, ajouté au fait que nous pourrions préparer et traiter les combustibles nucléaires dans le pays même, sans dépense de devises, nous permet d'envisager cette solution comme celle qui s'adapterait le mieux aux intérêts du pays.

En fait, la question primordiale qui se pose n'est pas de savoir quel sera le coût en argent, mais bien le coût réel dans le sens suivant : compte tenu des exigences supérieures de la sécurité nationale, des nécessités actuelles et des nécessités dans un proche avenir, vaudra-t-il mieux, pour fournir au pays un kilowattheure additionnel d'énergie, recourir aux méthodes classiques, ou bien s'orienter résolument vers la création d'une industrie nationale ?

La construction de centrales électronucléaires suppose que l'on soit préalablement familiarisé avec un secteur de la technologie dans lequel le Brésil manque encore d'expérience et de pratique. Nous sommes parfaitement conscients de cette carence, ainsi que des difficultés qui se rattachent à l'ampleur du problème que nous cherchons à résoudre. Certes, un examen objectif de nos possibilités actuelles en ce qui concerne l'élément spécialisé révèle que le pays ne dispose que d'un nombre limité de chercheurs qualifiés dans ce secteur. Nous pouvons affirmer cependant que, grâce à la politique d'encouragement que nous cherchons à généraliser en matière d'études nucléaires et dont l'exécution est poursuivie par notre Commission de l'énergie atomique et par notre Conseil national de la recherche scientifique, le nombre des étudiants diplômés et des techniciens spécialisés est en train de s'accroître rapidement et parviendra, en peu d'années, à modifier nos cadres de manière quantitativement appréciable en ce qui concerne la recherche scientifique et la technologie. Dans le domaine des sciences annexes indispensables à l'établissement de l'industrie atomique, la situation est favorable si l'on considère que le pays dispose actuellement d'usines en plein fonctionnement pour l'extraction du thorium et possédera bientôt des usines destinées à produire de l'uranium et du thorium nucléairement purs.

Un problème qui a tout particulièrement retenu l'attention de la Commission de l'énergie atomique est celui de la connaissance exacte des ressources atomiques réelles du pays. Depuis plusieurs années, un programme de prospection systématique est en exécution et a déjà révélé de nouveaux et importants gisements de minerai d'uranium et, surtout, de thorium, dans des régions du pays où l'on n'en soupçonnait pas l'existence. Les ressources connues jusqu'à ce jour nous permettront ainsi d'établir un programme atomique avec la certitude préalable que nos ressources en combustibles nucléaires ne feront pas défaut lorsqu'il s'agira de satisfaire les besoins en énergie prévus pour les années à venir. Notre position à cet égard devient tout à fait exceptionnelle lorsque l'on considère que, d'après les données les plus récentes, le thorium semble, en réalité, encore plus que l'uranium, le combustible nucléaire de l'avenir.

La solution de ce problème fondamental pourra être accélérée par la coopération internationale dont cette assemblée est un premier et remarquable exemple : le Brésil sera heureux de faire appel aux savants et aux techniciens d'autres pays qui voudront collaborer avec lui, contribuant à la solution aussi rapide que possible de cette grande question de l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques. Quant à nous, notre intention est d'encourager cette coopération par tous les moyens, en donnant l'ampleur nécessaire à la contribution qui pourra nous être apportée par la technique et la science, au lieu de fonder notre développement futur sur l'importation d'équipements fabriqués à l'étranger, lesquels ne permettraient pas l'évolution de notre pays dans les conditions de sécurité et de souveraineté auxquelles nous ne pouvons ni ne voulons renoncer.

M. Iraolagoitía (Argentine) présente le mémoire P/1002.

M. Mayer (États-Unis d'Amérique) présente le mémoire P/475 et ajoute les observations ci-après : J'ai procédé à quelques calculs très approximatifs simplement pour indiquer ce que pourraient être les résultats d'études économiques sur le plan international. Les clichés que je vais vous montrer n'ont donc qu'une valeur indicative.

Dans l'étude du marché dont l'énergie électronucléaire pourra disposer sur le plan international,

Tableau 1

Prix comparés du charbon dans divers pays

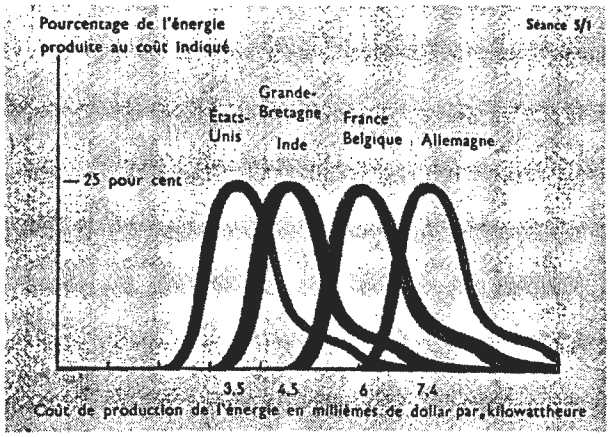
Pays	Prix de 10^6 Btu[a] en U. I.[b]	Indice	Millièmes de dollar/kWh pour le charbon	Valeur dominante du coût de production de l'énergie en millièmes de dollar/kWh	Méthode de détermination
Belgique	0,20	1,82	5,46	6,0	Évaluation
France	0,20	1,82	5,46	6,0	»
Allemagne	0,27	2,45	7,35	7,4	»
Grande-Bretagne .	0,15	1,36	4,08	4,5	»
Inde	0,15	1,36	4,08	4,5	»
États-Unis d'Amérique	0,11	1,00	3,00	3,5	Calcul

Source : P. C. Putnam, *Energy in the Future*, D. Van Nostrand, New York, 1953, p. 140.

[a] 1 Btu = 0,25 kilocalorie.

[b] U. I. : Unité internationale, définie comme étant le dollar des États-Unis d'Amérique de 1925-1934.

une considération importante sera celle du prix du combustible dans différentes parties du monde. Un des combustibles importants pour la production d'énergie électrique est le charbon. Les prix du charbon dans différents pays ont été indiqués par Putnam et une comparaison en est faite au tableau 1 : j'ai converti les données en millièmes de dollar par kilowattheure pour le charbon, cela sur la base des calculs faits aux États-Unis.

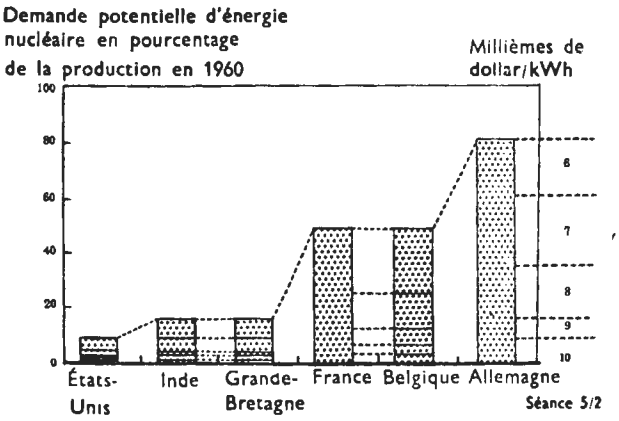


Cliché 1. — Distribution, calculée et évaluée, de la production d'énergie dans certains pays, en fonction du coût.

Si l'on admet que la demande potentielle d'énergie électronucléaire dans les pays énumérés par Putnam présente les mêmes caractéristiques générales qu'aux États-Unis, la grandeur relative du marché en fonction du coût pourra être approximativement celle qui est indiquée sur le cliché 1. Veuillez noter que toutes les courbes ont la même allure mais que les valeurs dominantes sont décalées proportionnellement aux différences entre les prix du combustible telles qu'elles apparaissent sur le tableau 1.

Si une étude approfondie sur le plan international devait montrer que les valeurs obtenues pour la distribution du marché sont vraiment analogues à la distribution calculée pour les États-Unis, ainsi que l'illustre le cliché 1, il serait très intéressant de déterminer l'incidence économique relative de l'énergie électronucléaire pour divers pays. Le cliché 2 est en accord avec le cliché 1 et le tableau 1 et avec les hypothèses prises pour base. Il convient de noter que l'incidence économique de l'énergie électronucléaire est relativement grande en Europe occidentale (continentale), pour des coûts allant de 0,006 à 0,010 dollar, et relativement faible aux États-Unis d'Amérique, en Grande-Bretagne et en Inde.

Bien que l'incidence relative de l'énergie électronucléaire semble être très limitée dans un pays tel que les États-Unis d'Amérique, même à un coût de production de 0,006 dollar le kilowattheure, le marché, grandeur absolue, n'est pas nécessaire-



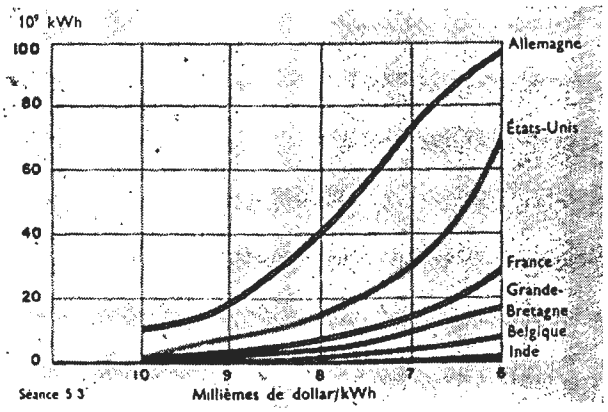
Cliché 2. — Incidence économique relative de l'énergie électronucléaire en 1960 dans certains pays (demande potentielle d'énergie indiquée en pourcentage de la production totale prévue pour 1960, répartie selon le prix de revient).

Note. — Données calculées pour les États-Unis d'Amérique et évaluées pour les autres pays.

ment petit. On voit par exemple sur le cliché 3 que la demande potentielle d'énergie électronucléaire est importante si on l'exprime en kilowattheures plutôt qu'en pourcentage de la production nationale d'énergie. La demande potentielle semble être grande en Allemagne, tant en valeur relative qu'en valeur absolue.

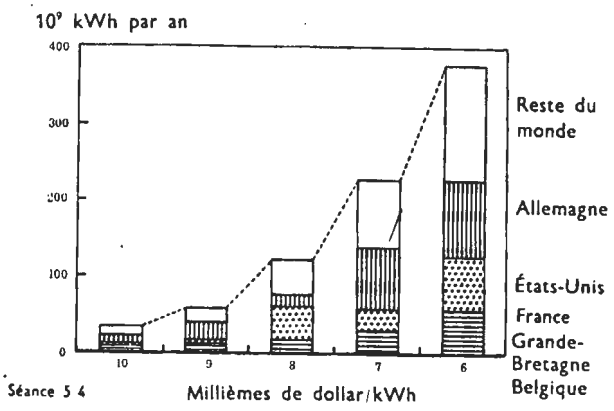
Si nous poursuivons notre raisonnement à partir des mêmes hypothèses, nous pouvons évaluer ce que pourrait être la demande d'énergie électronucléaire dans le monde.

Si l'on admet par exemple que la faculté de concurrence de l'énergie électronucléaire est la même dans le monde entier que dans la région de l'Atlantique nord, on aboutit au graphique reproduit sur le cliché 4. Il va sans dire qu'un coût de



Cliché 3. — Demande potentielle d'énergie électronucléaire dans divers pays en 1960, indiquée en fonction du coût de production.

Note. — Données calculées pour les États-Unis d'Amérique et évaluées pour les autres pays.



Cliché 4. — Demande potentielle d'énergie électronucléaire dans le monde en 1960, indiquée en fonction du coût de production.

Note. — Données calculées pour les États-Unis d'Amérique et évaluées pour les autres pays.

production atteignant même 0,008 dollar le kilowattheure laisserait prévoir une industrie de grande envergure.

Bien que les résultats qui figurent sur les clichés précédents donnent une idée des renseignements que fourniraient des analyses sur le plan international, rien ne peut remplacer l'étude et l'observation directes. On constatera, j'en suis certain, que les conditions essentielles d'un marché important pour l'énergie électronucléaire seront un coût élevé des combustibles, une forte consommation d'énergie, la concentration des marchés de l'énergie et des facteurs d'utilisation élevés.

Des études économiques quantitatives du genre de celles qui sont évoquées dans ce mémoire devraient intéresser les gouvernements, ainsi que certaines industries et entreprises privées. Dans tous les cas, on a prévu certaines règles pour que les ressources ne soient pas mal employées. S'il s'agit d'un gouvernement, la politique économique ne devrait orienter les capitaux vers l'exploitation de l'énergie nucléaire que si aucune autre solution n'offre la perspective d'un rendement supérieur. S'il s'agit d'une industrie, des études économiques devraient déterminer quelles sont les applications de l'énergie nucléaire qui offrent les plus grandes possibilités de bénéfices, et indiquer l'orientation à donner à la recherche et aux programmes. En ce domaine, une utilisation peu judicieuse des ressources pourrait conduire à la faillite.

Nous espérons que les études décrites dans le présent mémoire susciteront de nouvelles recherches sur les incidences économiques de l'énergie nucléaire, et cela avant que les pays ou les organismes intéressés ne s'engagent dans de vastes programmes, coûteux et mal équilibrés, en matière de recherche physico-chimique.

Enfin, nous espérons que les études économiques précédemment discutées seront de quelque profit pour ceux qui travaillent dans le même domaine en leur fournissant un plan d'étude, une méthode d'analyse ainsi qu'une présentation systématique de données que d'autres nations, industries ou entreprises pourront utiliser.

Sir John Cockcroft (Royaume-Uni) présente le mémoire P/389.

DISCUSSION DES MÉMOIRES P/893, P/11, P/327, P/758, P/145, P/1002, P/475 et P/389

M. Blokhintsev (U.R.S.S.) : Dans son mémoire, Sir John Cockcroft mentionne la possibilité de remplacer les piles à ralentisseur en graphite par des piles à ralentisseur en eau. Cependant, autant que nous puissions en juger, ce sont des piles à ralentisseur en graphite et refroidies au gaz, qui ont jusqu'à présent été utilisées au Royaume-Uni. Cette tendance initiale dans la construction des piles au Royaume-Uni est-elle inspirée par la prudence, c'est-à-dire par la crainte que les piles à ralentisseur en eau ne soient difficiles à contrôler, ou s'explique-t-elle autrement ?

Sir John Cockcroft (Royaume-Uni) : M. Blokhintsev pose une question relative au développement de notre programme. Nous pensons commencer par des piles à ralentisseur en graphite, qui sont susceptibles d'un développement considérable, pour passer ensuite à des types plus avancés, par exemple des piles à ralentisseur en eau, dont nous avons établi par nos études qu'elles sont économiquement plus avantageuses; il nous paraît cependant très probable qu'en 1965 nous utiliserons les autres types de piles.

Une autre question que l'on m'a posée concerne l'évaluation du prix du kilowattheure d'électricité qui sera produit à Calder Hall. Sur ce point, je ne puis que répéter les chiffres que M. Jukes a donné hier, et d'après lesquels le coût de l'électricité produite par les types améliorés de piles à ralentisseur en graphite dont la construction est prévue pour la Central Electricity Authority, serait d'environ 0,6 penny le kilowattheure, compte tenu d'un abattement raisonnable pour le plutonium. M. Jukes a cité un chiffre d'environ 0,7 penny pour le cas où la valeur du plutonium produit ne serait pas déduite. On a d'autre part demandé si les chiffres comprennent le coût de l'achat des cartouches actives. Tel n'est pas le cas; en effet, en donnant ces chiffres, nous avons admis que les cartouches d'uranium seront réintroduites dans la pile; d'autre part, en calculant l'abattement relatif au plutonium, nous avons tenu compte du coût de son extraction.

M. Libby a demandé si les ressources en minerai d'uranium me paraissent devoir suffire pour la plus grande partie du monde si elles sont utilisées pour produire de l'énergie électronucléaire. Je me suis fié dans une grande mesure aux prévisions faites par M. Jesse Johnson, de la Commission de l'énergie atomique des États-Unis, en disant qu'à mon avis

les quantités disponibles d'uranium seront amplement suffisantes, jusque vers 1965-1975, pour le développement prévu de l'énergie électronucléaire. J'ai dit aussi qu'à la fin de ce siècle nous aurons tellement amélioré le taux d'utilisation de l'uranium que la situation sera probablement encore plus favorable. Mais je dois toutes ces données à M. Jesse Johnson.

Le R. P. DE BREUVERY (Organisation des Nations Unies) donne lecture de la question suivante que lui pose M. W. K. Davis, des États-Unis d'Amérique : « A propos de l'implantation des petites génératrices nucléaires, pourriez-vous donner quelques précisions sur les difficultés que soulève le transport de la centrale nucléaire elle-même, dont le poids est considérable — supérieur à celui d'une centrale classique — et sur l'importance de l'eau de refroidissement pour le choix de l'emplacement de la centrale ? »

L'emploi de piles dans des régions très lointaines à l'intérieur des territoires ne peut être envisagé qu'en vue, par exemple, de l'exploitation de gisements miniers dont la fusion et l'affinage sur place permettraient le transport rentable par avion. Des propositions dans ce sens ont été déjà faites pour certaines régions de l'Asie du Sud et cette façon de faire a déjà été pratiquée dans certains territoires de l'Afrique.

Là où nous avons des conditions favorables pour le transport économique de produits raffinés par avion, on pourrait envisager également le transport par air de « package reactors ». Il est évident que ces piles ne pourraient être situées qu'à un endroit où une quantité d'eau suffisante pour le refroidissement serait disponible. Il convient toutefois de mentionner que certains types de piles sont à l'étude dans lesquels la consommation d'eau serait considérablement réduite.

M. AHMAD (Pakistan) : Serait-il possible au Département des affaires économiques et sociales d'entreprendre des études spéciales dans certaines régions particulièrement représentatives des pays sous-développés en vue de déterminer, compte tenu des différents facteurs énumérés dans le rapport, le coût de production et de distribution de l'énergie électrique classique et de l'énergie électronucléaire ? De telles études seraient extrêmement utiles pour l'établissement des plans de développement économique pour ces pays.

Le R. P. DE BREUVERY (Organisation des Nations Unies) : Je n'ai pas autorité pour parler au nom du Département des affaires économiques et sociales, mais il me semble que, dans ce cas, on devrait utiliser la procédure normale qui pourrait être, soit une requête des gouvernements à l'Administration de l'assistance technique, soit une requête adressée au Département des affaires économiques et sociales; mais dans ce dernier cas les frais de voyage et d'étude devraient être supportés par le gouvernement intéressé.

M. NUMANN (Irak) : Dans quelle mesure une petite génératrice nucléaire serait-elle adaptée aux conditions suivantes : d'une part, pétrole à très bon marché, mais, d'autre part, centres de consommation très dispersés et consommation faible ?

Le R. P. DE BREUVERY (Organisation des Nations Unies) : Quand on parle du prix des produits pétroliers bon marché, j'imagine que l'on considère ce prix au point de production. Or, tout le raisonnement qui a été fait au sujet des énergies classiques dans les pays sous-développés est basé sur la distinction entre le prix de production et le prix de livraison. Dans le cas présent, il s'agit de points de consommation très dispersés, et on nous signale que leur consommation serait faible. Cela élimine la possibilité d'utiliser des pipe-lines ou des navires-citernes, qui sont les seuls moyens de transport économiques. Nous serions réduits à transporter les produits pétroliers par petits barils, par exemple, et alors le prix deviendrait très élevé par unité de quantité d'énergie.

Il semble que dans le cas présent on doive appliquer les principes énoncés à la fin du rapport : plus grande est la distance entre la source d'énergie et les points de consommation, plus grand aussi peut être l'avantage que procure l'utilisation de l'énergie nucléaire. Il faudrait évidemment que nous disposions de centrales nucléaires de petites dimensions puisqu'elles devraient remplacer de petits diesels.

M. LIBBY (États-Unis d'Amérique) : Pensez-vous que 0,030 dollar le kilowattheure avec un facteur d'utilisation de 50 pour cent pourrait être un prix de concurrence en un point quelconque du monde ?

Le R. P. DE BREUVERY (Organisation des Nations Unies) : Absolument; si j'avais le temps, je pourrais vous donner un certain nombre de chiffres probants. Dans certaines régions, le coût du kilowattheure dépasse de beaucoup 0,030 dollar, et je pourrais citer un cas où il atteint 0,055 dollar.

M. CATS (Israël) : Je voudrais souligner l'importance du taux d'intérêt, qui est l'un des principaux facteurs déterminant la possibilité économique d'introduire l'énergie électronucléaire dans les pays sous-développés. Si la considération fondamentale, du point de vue économique, en faveur de l'introduction de l'énergie électronucléaire est que les fortes économies réalisées sur le combustible ne seront contrebalancées qu'en partie par un accroissement des charges financières dans le cas des centrales nucléaires, il faut que ces charges soient maintenues à un niveau tel qu'elles ne dépassent pas la différence entre le coût du combustible des centrales classiques et celui des centrales nucléaires. Il est facile de calculer que si, dans le cas des centrales nucléaires, les frais d'investissement supplémentaires sont de 150 dollars par kilowatt (chiffre qui paraît raisonnable d'après les différents mémoires qui ont été présentés ici) avec un facteur d'utilisation de 60 pour cent (ce qui est beaucoup

pour les pays sous-développés, vu l'absence de charge nocturne) et avec un rendement financier de 15 pour cent (ce qui est peu pour lesdits pays), les charges financières supplémentaires se chiffreraient à 0,004 3 dollar par kilowattheure. A ma connaissance, il y a fort peu de pays sous-développés où l'on puisse obtenir une pareille économie de combustible.

La solution semble être, par conséquent, de réduire les charges financières par une diminution du taux de l'intérêt; il faudrait pour cela recourir à des fonds provenant des instituts financiers internationaux, les fonds publics locaux ne pouvant fournir les montants qu'exige un équipement électronucléaire.

M. GAGNON (Canada) : Je désire poser une question au sujet du mémoire P/11. Il y est parlé de la production et de l'utilisation de l'énergie nucléaire sous forme d'électricité. Qu'en est-il des piles atomiques en tant que source de chaleur ? Les piles peuvent-elles être utilisées pour produire de la chaleur aussi bien que de l'électricité ?

M. J. DAVIS (Canada) : Certes, l'énergie nucléaire pourra jouer un rôle très important dans l'avenir comme source de chaleur. En effet, plusieurs applications pourront, dans les dix ou vingt années à venir, trouver leur réalisation dans des pays comme le Canada. Par exemple, nous savons étudié la possibilité d'utiliser une pile thermique de puissance moyenne, de l'ordre de 20 000 kW, pour produire surtout de la chaleur et non de l'électricité. Elle offrirait le grand avantage de fonctionner à des températures relativement basses et pourrait, par exemple, être utilisée dans l'industrie de la pâte et du papier, où les besoins en chaleur sont grands et où le facteur d'utilisation est vraiment élevé. Si de l'électricité était produite en même temps, ce serait véritablement à titre accessoire.

Il existe encore une autre possibilité dans des régions septentrionales, ou des régions où les combustibles classiques sont également coûteux : la chaleur produite par une turbine à contre-pression pourrait être utilisée pour le chauffage des locaux. On diminuerait ainsi les dépenses qu'entraîne normalement le transport à longue distance des combustibles classiques servant au chauffage des locaux.

M. KAY (Royaume-Uni) : M. Libby, des États-Unis d'Amérique, m'a posé la question suivante : « Vos conclusions risquent-elles d'être compromises par des progrès techniques touchant, par exemple, le rendement des piles autorégénératrices ou des piles à combustible enrichi, plutôt que les piles à uranium naturel et à graphite, refroidies au gaz, que vous avez envisagées ? »

Je parlais de l'évolution probable au cours des dix à quinze prochaines années. Je ne pense pas que cette période permette une mise au point aussi rapide des piles autorégénératrices ou de piles à combustible fortement enrichi d'un autre type; ce qui ne veut nullement dire qu'elles ne puissent, d'ici vingt ou trente ans, s'imposer et jouer un rôle de premier plan. Cependant, pour ce qui est de la première phase du programme, je suis entièrement d'accord avec Sir John Cockcroft pour mettre l'accent sur les piles à ralentisseur en graphite et refroidies au gaz, lesquelles pourraient être suivies par l'une ou l'autre des piles à réfrigérant liquide qui en sont déjà au stade du prototype.

M. MAYER (États-Unis d'Amérique) : M. Jukes m'a posé la question suivante : « Les centrales électronucléaires exigent des dépenses en capital plus élevées que les autres centrales. Elles sont par conséquent les plus avantageuses lorsqu'elles fonctionnent avec un taux d'utilisation élevé, c'est-à-dire pendant un fort pourcentage du temps total. Quel effet le taux d'utilisation a-t-il sur les caractéristiques du marché de l'énergie électronucléaire ? »

M. Jukes a tout à fait raison. Pour autant que nous sachions, les dépenses en capital seront plus élevées pour une centrale électronucléaire. Il faut en tenir compte dans une étude du marché. En d'autres termes, il ne faut pas se fonder avant tout sur l'équipement et ses possibilités matérielles. Il y a là un point important : on doit étudier les caractéristiques du marché pour déterminer quel sera le temps d'utilisation. Il ne suffit pas de dire qu'une centrale électronucléaire doit avoir un facteur d'utilisation élevé s'il n'y a pas de demande pour l'énergie produite pendant la plus grande partie du temps. Dans l'étude que j'ai décrite, il a été automatiquement tenu compte de cela : en effet, pour fixer la part du marché que l'énergie électronucléaire pourrait obtenir à 0,006 ou 0,008 dollar, il a fallu calculer le prix de revient de l'énergie électronucléaire en tenant compte de la puissance de la centrale, de son taux d'utilisation et de tous les autres facteurs d'importance économique.

M. DARDANO (Salvador) : Quelle possibilité y a-t-il que les réseaux de transport d'énergie soient à l'avenir plus économiques que ceux dont on a parlé, de façon qu'on puisse construire des centrales nucléaires très puissantes ?

M. MAYER (États-Unis d'Amérique) : Je crois que cette question se pose de la façon suivante : si des progrès sont faits à l'avenir dans le transport de l'énergie, n'aideront-ils pas l'énergie nucléaire à s'assurer une part du marché ? Dans mon étude, j'ai admis qu'aucun progrès important ne serait fait dans les dix ou vingt prochaines années en matière de transport d'énergie. Si toutefois des progrès sont réalisés dans le transport de l'énergie des centrales aux centres de consommation, ils profiteront aussi bien aux centrales classiques qu'aux centrales électronucléaires, et la concurrence portera toujours sur le coût de l'énergie au départ de la centrale.

Séance 24.2

INSTRUCTION ET FORMATION DU PERSONNEL EN MATIÈRE D'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

LISTE DES MÉMOIRES

			Pages
P/983	Formation du personnel de recherches dans le domaine de l'utilisation pacifique de l'énergie atomique	UNESCO	541
P/466	Enseignement professionnel et formation du personnel technique pour l'énergie nucléaire	B. L. Goodlet et A. S. White	547
P/755	L'enseignement théorique et pratique des sciences nucléaires pures et appliquées aux États-Unis d'Amérique	E. E. Anderson *et al.* . .	550
P/779	L'enseignement et la formation professionnelle en matière d'utilisation de l'énergie atomique dans les domaines de la santé et de la médecine	Organisation mondiale de la santé	560

Formation du personnel de recherches dans le domaine de l'utilisation pacifique de l'énergie atomique

par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture

Chaque fois qu'une technique nouvelle est venue prendre sa place parmi les réalisations industrielles de l'époque moderne, elle a apporté un certain trouble dans le recrutement et la formation du personnel scientifique et technique indispensable à de telles réalisations. Dans le passé, les différentes étapes de la grande révolution industrielle du XIX^e siècle se sont produites avec assez de lenteur pour que les ajustements nécessaires aient pu se faire au fur et à mesure des besoins. Lorsque par exemple il s'est avéré qu'un nombre important d'ingénieurs allait être absorbé par les entreprises de constructions électriques, l'on a assisté à la création d'écoles spécialisées, telle par exemple l'École supérieure d'électricité à Paris, destinées à satisfaire ces besoins grandissants. La formation spéciale que doit recevoir un ingénieur ou un chercheur scientifique se superpose en réalité à une formation générale beaucoup plus lente à se modifier, et l'on peut estimer qu'après une période allant de 2 à 5 ans des écoles nouvelles sont capables de déverser sur le marché des promotions de jeunes gens préparés de façon adéquate. En tenant compte du temps nécessaire pour que les pouvoirs publics ou les autorités privées intéressées se rendent compte des besoins et de leur urgence, en tenant compte également du temps qu'il faut pour mettre sur pied des enseignements nouveaux avec les instruments indispensables pour une formation pratique, on voit que ce n'est qu'après 10 ou 15 ans que le mouvement aura acquis un élan suffisant pour que l'on ne constate plus de déficience et de difficulté dans le recrutement.

Dans le cas qui nous intéresse actuellement et qui est celui de l'utilisation pacifique de l'énergie atomique, il est clair qu'une accélération notable de ce mouvement sera nécessaire si l'on veut faire face de façon adéquate aux besoins à venir. La situation se complique d'ailleurs du fait que de nombreuses nations qui avaient jusqu'à présent fait appel surtout à des établissements d'enseignement étrangers pour la formation de leur personnel technique, ressentent le besoin très légitime d'effectuer cette formation de plus en plus sur leur propre plan national. Pour toutes ces raisons, il est utile de donner à ces problèmes une attention soutenue et l'établissement de recommandations précises, adressées aux autorités responsables dans les différents pays, pourrait peut-être les aider dans ces circonstances.

A propos de la question qui nous intéresse ici, se pose le même dilemme que l'on rencontre lors de l'organisation de toutes les formations spécialisées. Il s'agit de savoir jusqu'à quel point doit être menée l'éducation générale et, lorsque commence la spécialisation, à quel degré de raffinement elle doit être poussée avant l'entrée des jeunes gens dans la carrière proprement dite qu'ils ont choisie.

En ce qui concerne l'énergie atomique, il est clair que l'éducation générale doit contenir certains éléments essentiels de mathématiques, de physique et de chimie, et qu'il serait dangereux de ne pas ajouter quelques notions de biologie. Ce n'est qu'à partir d'un fond de connaissances de cet ordre, très solidement constitué, que l'on peut sans inconvénient aborder les domaines très spéciaux avec lesquels l'ingénieur ou le chercheur doit être familiarisé pour pouvoir réussir.

L'opinion la plus souvent rencontrée est que les études fondamentales devraient inclure dès maintenant un certain nombre de chapitres de physique, de mathématiques et de chimie qui étaient considérés jusqu'à présent comme faisant partie des études de spécialité. L'enseignement correspondant devrait par conséquent être donné à l'Université au cours des études normales.

Si une telle intégration de plusieurs domaines très modernes de la science a déjà été réalisée de façon satisfaisante dans certains grands centres, il faut cependant reconnaître que dans nombre de pays les jeunes gens qui sortent de l'Université n'ont pas reçu un enseignement suffisamment approfondi dans ce domaine. Ils ne peuvent alors s'adresser avec fruit aux Écoles spéciales dans lesquelles ils pourraient recevoir une formation complémentaire, celle qui leur donnerait les qualités de chercheur ou d'ingénieur nucléaire.

FORMATION

Afin de procéder à une revue des types d'enseignement qui devraient être donnés aux différents types de chercheurs et d'ingénieurs, revue qui sera par nécessité rapide et incomplète, nous allons

considérer quatre catégories de personnel : les ingénieurs de recherche et les ingénieurs d'exécution, les chercheurs scientifiques et les techniciens.

Ingénieurs de recherche

Il est clair que pour cette catégorie comme pour celle des ingénieurs d'exécution, l'enseignement donné normalement dans les écoles qui délivrent des diplômes d'ingénieurs doit être complété sur plusieurs points; ainsi, quoique l'on puisse considérer que ce sont là essentiellement des questions théoriques, il paraît extrêmement utile que les ingénieurs de recherche reçoivent un enseignement fondamental de mécanique quantique et de relativité. Ces matières jouent pour les particules nucléaires et atomiques (ions, électrons, neutrons, protons) le rôle que joue la mécanique rationnelle pour les solides et les fluides dont traite ordinairement la pratique industrielle. A ces notions théoriques de base viendront s'ajouter des connaissances plus expérimentales relatives à la radioactivité et à l'électronique. Enfin dans le domaine de la physique générale, des connaissances approfondies sur la théorie moderne des solides ainsi que sur la thermodynamique, surtout en ce qui concerne la transmission de la chaleur, doivent être considérées comme indispensables. Il se peut que l'ensemble de ces enseignements ne puisse être inséré dans la durée normale actuelle des études conduisant à l'obtention des diplômes d'ingénieur, et qu'il faille considérer l'adjonction d'une période de formation supplémentaire pour les ingénieurs de recherche qui se destinent à l'énergie atomique. Enfin l'introduction dans l'enseignement pratique qu'ils recevront des techniques courantes de la physique nucléaire doit pouvoir se faire sans augmenter excessivement les programmes : il s'agira de travaux pratiques sur les rayonnements de la radioactivité, les compteurs de Geiger-Müller, la technique du vide, les circuits électroniques et la haute fréquence.

Ingénieurs d'exécution

Il ne sera pas nécessaire pour les ingénieurs de cette catégorie de pousser très loin les études de mécanique quantique et de relativité. Des notions suffiront à condition que, par contre, l'enseignement de la radioactivité, de l'électronique, de la physique des solides, de la chimie-physique (corrosion) et de la thermique, soit poussé beaucoup plus loin que lorsqu'il s'agit de former un ingénieur-mécanicien.

En ce qui concerne les travaux pratiques, les sujets seront les mêmes que pour les ingénieurs de recherche. Il faut seulement insister sur la nécessité pour tous les ingénieurs de posséder certaines notions de biologie, principalement sur l'action des rayonnements sur les êtres vivants. Une connaissance profonde des phénomènes sur lesquels se basent les réglementations de protection qui s'appliquent au fonctionnement des appareils nucléaires peut seule inspirer le respect absolu de ces règlements. On trouvera dans l'annexe 1 l'indication plus précise des différentes matières qui peuvent faire l'objet des enseignements spéciaux destinés aux ingénieurs. Comme nous l'avons vu dans l'introduction, il sera toujours nécessaire que ces ingénieurs se familiarisent dans l'établissement même auquel ils seront attachés ou dans un établissement similaire, avec l'équipement spécial et les machines puissantes qu'il n'est ni possible ni souhaitable d'installer dans les institutions d'enseignement.

Chercheurs

Les grands établissements créés au cours de ces dernières années pour l'utilisation de l'énergie atomique, commissions, centres, commissariats, utilisent un grand nombre de chercheurs scientifiques plus ou moins spécialisés dans le domaine des mathématiques, de la chimie, de la physique et de la biologie. Il n'est pas possible de concevoir un enseignement unique s'appliquant à un personnel aussi hétérogène, sauf en ce qui concerne les notions scientifiques générales acquises avant d'entrer à l'université. Par contre, au cours des études universitaires proprement dites, il sera indispensable que les futurs chercheurs acquièrent un certain nombre de notions théoriques et pratiques qui ne devront leur faire défaut à aucun moment de leur carrière ultérieure. Ainsi une connaissance approfondie des phénomènes de la radioactivité est aussi nécessaire aux futurs biologistes qu'aux futurs théoriciens.

Mathématiques

En ce qui concerne les mathématiciens, contentons-nous de signaler l'utilité qu'il y aurait à leur donner une sérieuse préparation dans les sciences physiques, en y comprenant la radioactivité et la physique nucléaire, la mécanique physique et la thermodynamique.

Physique

La mécanique quantique et la relativité, auxquelles doit s'ajouter le calcul des probabilités, formeront la base théorique qui doit venir en complément de la physique classique. Une étude approfondie des rayonnements, depuis les spectres optiques jusqu'au rayonnement nucléaire et au rayonnement cosmique, devra faire l'objet d'un enseignement spécial auquel il sera bon d'ajouter la théorie moderne des solides. Enfin la physique nucléaire proprement dite englobant la radioactivité naturelle complètera l'enseignement spécial de base des chercheurs scientifiques dans le domaine de la physique.

En ce qui concerne l'enseignement pratique, il portera sur les techniques utilisées dans le domaine de l'énergie atomique : technique du vide, détecteur de particules et de rayonnement, circuits électroniques d'amplification et de comptage, accélérateurs de particules, spectrographes de masse. On trouvera en annexe 2 une liste plus détaillée des

matières pouvant faire l'objet de l'enseignement spécial donné aux chercheurs.

Chimie

C'est la chimie générale et la chimie minérale qui constitueront sans doute la partie essentielle de la formation du chimiste qui se destine à la chimie nucléaire. Comme enseignements spéciaux, signalons la chimie-physique et l'électrochimie, la spectroscopie, la physique de l'état solide et la thermodynamique. Rappelons encore la nécessité de connaissances détaillées de radioactivité et de physique nucléaire. Un certain nombre de chimistes se spécialiseront sans doute dans l'application des éléments traceurs et des molécules marquées. En ce qui concerne les connaissances pratiques, il paraît surtout essentiel d'insister sur la nécessité pour les chimistes de posséder de bonnes connaissances biologiques leur permettant de comprendre l'action des rayonnements et des substances toxiques.

Biologie

En dehors de la formation générale, le biologiste qui veut se spécialiser dans le domaine de l'énergie atomique devra posséder les connaissances déjà signalées en radioactivité et en physique nucléaire. Les propriétés des rayonnements devront lui être familières en théorie et en pratique. Le calcul des possibilités et les méthodes statistiques constitueront un complément de mathématiques indispensable. Une partie importante des recherches biologiques se base sur l'utilisation des radioisotopes et des isotopes stables, surtout sous la forme de molécules marquées. Comme l'emploi de ces techniques exige une série de connaissances pratiques qui ne peuvent s'acquérir que par l'usage, il est à recommander vivement que les biologistes acquièrent des connaissances pratiques suffisantes sur les circuits électroniques et les détecteurs de particules, ainsi que sur les émulsions photographiques.

Techniciens

En dehors des ingénieurs et des chercheurs proprement dits, il faut indiquer l'importance pour les établissements consacrés à l'énergie atomique de posséder un nombre suffisant de techniciens. Il s'agit de personnes ayant reçu un solide enseignement de base, mais n'ayant pas nécessairement fréquenté l'Université. De nombreuses écoles techniques telles que le Conservatoire des arts et métiers à Paris par exemple, donnent une formation technique générale suffisante, mais il serait important de considérer, pour certaines de ces écoles techniques au moins, l'adjonction de cours complémentaires consacrés à des techniques spéciales telles que la technique du vide, des circuits électroniques, la chimie-physique et l'électrochimie. Cet enseignement ne devra pas négliger certains aspects théoriques sans les approfondir à l'excès, de façon à pouvoir permettre la compréhension ultérieure de techniques nouvelles. Ici encore la radioactivité constituera un des domaines d'études indispensables auxquels il faut ajouter l'action des rayonnements sur les êtres vivants, ceci pour les raisons de sécurité déjà indiquées en ce qui concerne les ingénieurs.

MAINTIEN DES CONTACTS SCIENTIFIQUES

Pour que le chercheur et l'ingénieur de recherche conservent des qualités élevées au cours de leur travail professionnel, il ne faut pas qu'ils se contentent de la formation qu'ils ont reçue dans l'Université et dans les écoles spéciales. Ils doivent maintenir un contact permanent avec les progrès de la science dans les domaines qui les intéressent, par le moyen des publications scientifiques, des sociétés et des visites d'autres établissements.

Publications scientifiques

Les établissements consacrés à l'énergie atomique doivent posséder un service de documentation et une bibliothèque. Les chercheurs et les ingénieurs devront être encouragés à se servir de ces dispositifs pour se maintenir au courant par des lectures appropriées; l'organisation de séminaires intérieurs aux établissements visés représente un moyen très efficace pour obtenir le résultat cherché.

Sociétés scientifiques

Depuis le développement rapide des sciences nucléaires, les sociétés scientifiques nationales et les unions internationales organisent chaque année un nombre assez élevé de colloques et de congrès spécialisés. Il faut vivement recommander aux chercheurs et aux ingénieurs de recherche d'assiter à ces réunions, soit parce qu'ils peuvent contribuer à leurs travaux, soit parce qu'ils peuvent puiser dans les contacts avec d'autres chercheurs une impulsion nouvelle pour leurs propres travaux.

Visites

Enfin rien ne peut remplacer pour le chercheur ou l'ingénieur de recherche les visites d'établissements travaillant dans le même domaine dans d'autres pays que le sien. Les techniques ne sont jamais uniformes, les lignes principales suivant lesquelles les problèmes sont indiqués diffèrent notablement selon les groupes et les écoles. En plus des connaissances effectives qu'il acquerra, le chercheur ou l'ingénieur trouvera au cours de ses visites un encouragement dans ses propres recherches.

ROLE DE L'UNESCO

Il y a dans le programme de l'UNESCO plusieurs domaines qui présentent un rapport étroit avec la formation des ingénieurs et des chercheurs.

En ce qui concerne l'enseignement proprement dit, le programme d'assistance technique a permis à l'UNESCO d'envoyer un grand nombre d'experts organiser l'enseignement, et enseigner dans des

écoles techniques de différents pays. L'UNESCO a également publié une série d'inventaires du matériel d'enseignement scientifique dont plusieurs volumes sont relatifs aux écoles supérieures techniques et aux écoles d'ingénieurs.

En ce qui concerne l'organisation de la recherche et la formation des chercheurs, l'UNESCO a pu envoyer dans le cadre de son programme d'assistance technique et de son programme d'aide aux États membres, des professeurs d'enseignement supérieur dans la physique nucléaire et les rayons cosmiques pour constituer dans différentes universités des groupes de travail et des laboratoires dans lesquels les meilleures conditions seront réalisées pour la formation de nouveaux chercheurs.

Grâce à son programme d'échanges de personnes, l'UNESCO envoie depuis plusieurs années des boursiers acquérir la formation spéciale nécessaire pour leurs travaux dans les grands centres les mieux équipés. Un bon nombre de ces bourses ont pu être données dans les domaines de la physique, de la chimie et de la biologie en relation avec l'utilisation de l'énergie atomique.

L'UNESCO travaille à rendre plus faciles et plus efficaces les relations internationales entre les savants par un programme de documentation scientifique et par une politique de subventions accordées aux unions internationales scientifiques pour leurs congrès et leurs symposia.

En ce qui concerne la question particulière des recherches nucléaires, l'UNESCO se préoccupe de prendre des mesures de caractère international destinées à faciliter les recherches dans ce domaine. C'est ainsi que l'UNESCO a procédé à la création du Centre européen de recherches nucléaires et qu'elle est engagée actuellement dans une étude des actions internationales qu'elle pourrait entreprendre pour favoriser l'emploi scientifique des radioisotopes et des molécules marquées.

Enfin il y a lieu de signaler que l'UNESCO a entrepris un programme de diffusion scientifique qui a pour but de mettre au niveau d'un large public les résultats des recherches des savants qui resteraient sans cela peu accessibles. Ce programme de diffusion des Sciences qui est complété par un programme d'assistance aux clubs scientifiques et aux associations pour l'avancement des Sciences doit également avoir pour effet de susciter des vocations parmi les jeunes gens auxquels leurs dons permettent d'espérer une carrière intéressante dans la recherche et la technique. Ce point de vue est très important à l'heure actuelle où il y a lieu de craindre une insuffisance du recrutement des cadres qui seront nécessaires pour le développement des applications de l'énergie atomique.

CONCLUSION

Les quatre points suivants peuvent résumer l'essentiel de ce rapport :

Un effort doit être fait pour introduire dans le programme des études universitaires, qu'elles soient destinées à former des chercheurs ou des ingénieurs, les domaines nouveaux de la physique, de la chimie et de la biologie qui vont revêtir dans un très proche avenir une importance fondamentale.

Les détails pratiques des réalisations concrètes subissant des variations trop rapides, il n'est ni possible ni souhaitable de leur donner une trop grande importance dans l'enseignement général. Leur place se trouve beaucoup plus indiquée dans des centres de formation rattachés aux grands établissements d'application eux-mêmes.

Il faut engager vivement les futurs chercheurs et ingénieurs à étendre leurs connaissances fondamentales à certains domaines extérieurs à celui qu'ils ont choisi pour leur profession. Citons par exemple l'importance de l'étude de la radioactivité pour les chimistes, celle de la physique nucléaire pour les mathématiciens, etc.

Enfin certains enseignements, comme celui de la radiobiologie, doivent être rendus obligatoires pour toutes catégories de chercheurs, d'ingénieurs ou de techniciens qui auront à travailler dans le domaine de l'énergie atomique.

Annexe 1

(Exemple tiré d'une Université des États-Unis d'Amérique)

MATIÈRES POUVANT FAIRE L'OBJET D'ENSEIGNEMENTS SPÉCIAUX POUR LA FORMATION DES INGÉNIEURS DANS LE DOMAINE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE

Pour les ingénieurs d'exécution

Piles atomiques. — Rappel des chapitres de physique et de chimie qui sont particulièrement importants pour l'application envisagée. Étude des matières premières et de la production des substances fissiles. Notions essentielles sur les radioisotopes. Procédés d'utilisation de l'énergie des réactions nucléaires. Chimie et métallurgie des piles. Manipulation des matériaux actifs. Séparation des isotopes.

Effets biologiques des rayonnements nucléaires. — Effets résultant de l'absorption des rayonnements nucléaires sur des systèmes chimiques simples et complexes. Effets sur des organismes mono et polycellulaires. Effets sur les animaux et sur l'homme. Facteurs biologiques et physiques dont dépend l'action des rayonnements. Dosimétrie. Mesures de sécurité. Applications médicales et industrielles.

Pour les ingénieurs de recherche (physique)

Principes et construction des piles atomiques. — Transformations nucléaires qui se produisent dans les piles. Bilans neutroniques et nucléaires dans ces

réactions. Théorie de la production et de l'utilisation des neutrons dans les systèmes qui sont le siège de réactions en chaîne. Diffusion et ralentissement des neutrons. Type et fonction des piles atomiques. Piles homogènes et sans réflecteur. Piles thermiques avec réflecteurs. Piles hétérogènes.

Fonctionnement et application des piles atomiques. — Contrôle et fonctionnement des piles. Écrans de protection contre les rayonnements nucléaires. Production, transfert et utilisation de la chaleur dans les piles nucléaires. Utilisation pour la production d'énergie. Problèmes de construction, problèmes économiques.

Effets biologiques des rayonnements nucléaires (voir plus haut).

Pour les ingénieurs de recherche (chimie)

Chimie nucléaire. — Chimie de l'uranium, du plutonium et des produits de fission. Production des matériaux destinés aux piles nucléaires, purification de l'uranium. Séparation des produits des piles. Usage des solvants. Élimination des déchets radioactifs. Séparation des isotopes : théorie et pratique.

Effets biologiques des rayonnements nucléaires (voir plus haut).

Annexe 2

(Exemple tiré d'une Université française)

MATIÈRE POUVANT FAIRE L'OBJET D'ENSEIGNEMENTS D'UN COURS DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE DESTINÉ A LA FORMATION DES INGÉNIEURS ET DES CHERCHEURS EN PHYSIQUE ET EN CHIMIE

A. Base théorique

Relativité restreinte. — Exposé élémentaire:

La propagation de la lumière et la mécanique classique.

Le principe de relativité d'Einstein. Groupe de Lorentz.

Le principe de relativité et le champ électromagnétique.

Conséquences diverses de la transformation de Lorentz (relativité des longueurs; composition des vitesses, des accélérations; conservation de la charge).

Caractère relatif de la distinction entre champ électrique et champ magnétique.

Dynamique de la relativité : force, masse, énergie, variation de la masse en fonction de la vitesse, relation entre la masse et l'énergie.

Quadrivecteurs d'espace-temps.

Éléments de mécanique quantique:

1. Introduction et équation de Schrödinger. Interprétation probabiliste de la fonction d'onde.
2. Probabilités et valeurs moyennes.
3. Conditions aux limites imposées à Ψ. Valeurs propres et fonctions propres. Interprétations physiques.
4. Les relations d'incertitude.
5. Exposé d'ensemble des postulats de la mécanique quantique.
6. Étude de divers problèmes de quantification : particule dans un puits de potentiel, oscillateur harmonique, rotateur sphérique, atome d'hydrogène.
7. Propriétés des barrières de potentiel (réflexion, transmission, effet tunnel); évasion des corpuscules d'une cuvette de potentiel.
8. Le spin en mécanique quantique. Introduction des variables de spin selon le point de vue de Pauli; spin des particules.
9. Spin, parité des fonctions d'ondes, statistiques.
10. Statistiques de Fermi-Dirac et de Bose-Einstein.

Éléments de calcul des probabilités:

1. Notion de probabilité, d'épreuve, de variable aléatoire.
2. Loi binomiale.
3. Fonctions de répartitions — espérances mathématiques.
4. Lois de Gauss et de Poisson.
5. Distribution de Poisson.
6. Fonctions caractéristiques et applications.

B. Les rayonnements nucléaires

Classification.

Étude générale des chocs corpusculaires:

Résultats de l'application des théorèmes généraux.

Étude détaillée du choc élastique de deux particules en dynamique newtonienne:
Cas de l'interaction coulombienne.
Cas d'une force répulsive à rayon d'action déterminé.

Problèmes statistiques liés à l'étude d'un choc : section efficace.

Étude de quelques problèmes de chocs en dynamique relativiste (effet Compton).

La théorie des chocs en mécanique ondulatoire.

Rayonnements lourds:

Les particules alpha:

Propriétés des rayons alpha.

Ionisation par les particules alpha.

Interaction avec les noyaux.

Effets secondaires accompagnant le passage des rayons alpha dans la matière.

Protons, deuterons.

Neutrons :

Production.
Masse du neutron.
Détection.
Interaction avec la matière.

Particules légères :

Le rayonnement bêta :

Sources.
Propriétés caractéristiques.
Ionisation.
Ralentissement dans la matière.
Diffusion.

Les électrons positifs.

Les photons.

Le rayonnement cosmique.

C. Propriétés des noyaux

1. *Introduction.*
2. *Caractéristiques statistiques des noyaux stables :*
   Charge.
   Masse.
   Constitution — défaut de masse.
   Rayon nucléaire — définition — méthodes de mesures (bombardements corpusculaires, comparaison des énergies de liaison des noyaux « miroirs », émission des particules alpha par les noyaux radioactifs) — résultats.
   Propriétés liées au spin.
   Moment nucléaire quadripolaire — (rappel à ce sujet de quelques résultats relatifs aux multipoles).
3. *Noyaux artificiels :*
   Constante radioactive et période.
   Généralités sur les transformations radioactives.
   Réactions nucléaires.
   Détermination du nombre de charge.
   Détermination du nombre de masse.
   Détermination de la masse exacte.
4. *La structure des noyaux :*
   Justification du modèle protons-neutrons.
   Partitions et transitions isobariques.
   Le neutrino.
   Répartition des noyaux stables.
   Interaction entre nucléons et défaut de masse.
5. *Constitution des noyaux :*
   Principe d'exclusion.
   Noyaux légers, moyens ou lourds.
   Éléments sur les forces nucléaires.
6. *Radioactivité :*
   Présentation d'ensemble des faits expérimentaux.
   Propriétés statistiques.
   Filiations.
7. *La fission nucléaire.*

D. Les techniques de la physique nucléaire

1. *Le vide.*
2. *Détection des particules chargées et des photons :*
   Chambre à détente.
   Chambre à ionisation.
   Compteurs (proportionnels et de Geiger).
   Multiplicateurs électroniques.
   Compteurs à scintillations.
   Plaque photographique.
3. *Éléments d'électronique utilisés dans les techniques précédentes :*
   Amplification.
   Bases de temps.
   Comptage, échelles, coïncidences.
4. *Accélérateurs de particules :*
   Générateurs électrostatiques.
   Accélérateurs linéaires.
   Cyclotron.
   Bêtatron.
   Synchrotron.
5. *Détection des neutrons.*
6. *Spectrographie de masse.*
7. *Résonance magnétique nucléaire.*

Enseignement professionnel et formation du personnel technique pour l'énergie nucléaire

par B. L. Goodlet et A. S. White *

INTRODUCTION ET DÉFINITIONS

Le personnel technique employé en énergie nucléaire se compose d'ingénieurs, de techniciens et d'ouvriers. Les métiers de l'énergie nucléaire font appel à l'habileté et au savoir-faire déjà requis par l'industrie normale. Outre les connaissances essentielles de leur propre spécialité, les personnes qui appartiennent à chacune de ces catégories doivent, par conséquent, posséder des connaissances qui leur permettent de remplir avec efficacité le rôle qui leur est dévolu dans le domaine de l'énergie nucléaire.

Posons les définitions suivantes :

Un ingénieur (ou un technicien) nucléaire est un ingénieur (ou un technicien) de formation professionnelle normale, ainsi que le définit l'annexe ci-jointe, qui se consacre aux questions d'énergie nucléaire dans un poste qui exige une connaissance approfondie des phénomènes et des processus nucléaires.

« Exercer » signifie faire acquérir une routine, apprise par cœur, permettant d'accomplir sa tâche dans des conditions déterminées, sans qu'une compréhension parfaite des raisons profondes soit indispensable;

« Former » veut dire faire acquérir les connaissances spécialisées ou le savoir-faire dont on a besoin dans une occupation ou un travail déterminé et qui supposent la compréhension du motif de ses actes;

« Enseigner » vise à développer l'intelligence et à faire acquérir des connaissances afin de préparer à résoudre des problèmes qui *n'ont pas été expressément prévus* et qui peuvent ne s'être jamais présentés auparavant.

Toutes les personnes qui travaillent sur des questions d'énergie nucléaire doivent apprendre certains règlements et certains modes d'emploi relatifs à la sécurité, dont la complexité est fonction du travail qui leur est confié, mais qui, dans la plupart des cas restent très simples. Sur l'ensemble du personnel total, un seul agent sur quatre a besoin d'en connaître davantage.

Original : anglais.

* Atomic Energy Research Establishment, Harwell, England.

ENSEIGNEMENT ET FORMATION POUR INGÉNIEURS NUCLÉAIRES

On admet, en général, que l'enseignement et la formation pour ingénieurs ou techniciens comprend :

1. Une période destinée à l'étude des techniques; cette étude se fait ordinairement à l'université, ou dans un institut technique supérieur.

2. Une période d'acquisition de connaissances pratiques et d'une expérience de caractère général.

3. Une période de travail et d'étude sur un sujet spécial choisi.

Nous ne voyons pas la raison qui plaiderait en faveur d'une autre façon de procéder en énergie nucléaire, dont les spécialités ne devront pas occuper une large place avant la troisième période. En particulier, nous ne pensons pas qu'il soit souhaitable d'inscrire les techniques d'énergie nucléaire parmi les premiers titres qui peuvent être obtenus.

Ce point de vue peut donner lieu à controverses. Il est fondé sur une certaine conception de l'enseignement selon laquelle les écoles préparatoires des universités ont pour fonction d'inculquer des attitudes de l'esprit plutôt que de donner des connaissances. Suivant cette façon de voir, un institut technique d'université a une mission d'*enseignement* qui est de communiquer à ses élèves : *a*) l'habitude d'une réflexion claire et honnête; *b*) la curiosité d'esprit : habitude de poser des questions et de mûrir les réponses; *c*) l'aptitude à apprendre par soi-même en lisant et réfléchissant; *d*) le fondement des sciences et des techniques fondamentales mathématiques, physique et chimie; *e*) des idées sur la manière d'aborder un problème pratique pour, sans frais inutiles, en tirer un plan de travail; *f*) une teinture des connaissances sur l'appareillage, les procédés, les modes d'exécution et les méthodes d'élaboration qui correspondent au *domaine technique choisi* et qui donnent de bons résultats, ainsi que l'expérience pratique l'a prouvé.

Il n'est pas possible d'inclure tout ce qui précède dans l'emploi du temps d'un élève, si l'on y ajoute encore des cours sur les techniques de l'énergie nucléaire.

Un institut technique d'université a une mission de recherche qui est de rendre systématique et

d'accroître l'ensemble des connaissances techniques se rapportant aux nouveautés qui se font jour : *a*) en science pure; *b*) en recherche technique et dans l'industrie; *c*) dans ses propres laboratoires de recherche.

Les méthodes de recherche bien établies et soutenues par l'expérience sont encore très souvent secrètes dans le domaine de l'énergie nucléaire; de plus, l'appareillage de recherche dans les techniques de l'énergie nucléaire est trop important et trop coûteux pour que les universités, pour la plupart, puissent l'acquérir. Par conséquent, une université assumerait difficilement sa mission dans le domaine technique de l'énergie nucléaire; il est donc préférable qu'elle se concentre dans les domaines où elle excelle.

Une université qui désire former des ingénieurs nucléaires doit viser à améliorer l'enseignement des mathématiques, de la physique et de la chimie; de plus, la technique nucléaire pouvant exercer un influence importante sur l'évolution de l'humanité, l'université devra veiller à entraîner les ingénieurs nucléaires à considérer l'aspect général des choses et à envisager les incidences de leur activité sur les problèmes humains.

A notre avis, les techniques de l'énergie nucléaire ne devront pas avoir une large place dans l'emploi du temps d'un élève ou figurer parmi les sujets d'un premier examen. Nous pensons que des études sérieuses dans ce domaine se placent entièrement dans la seconde étape de notre programme d'enseignement.

Actuellement, les principales activités d'un ingénieur nucléaire se situent dans la fabrication et le traitement des matières fissiles et dans l'étude de la mise au point des génératrices nucléaires produisant de l'électricité par l'intermédiaire d'un moteur thermique.

L'ingénieur qui s'occupe de la fabrication et du traitement sera principalement un ingénieur-chimiste. Il devra cependant connaître un peu de physique nucléaire, en savoir un peu plus sur la radioactivité, et posséder de solides connaissances en chimie, en métallurgie et dans les techniques de fabrication des matières qu'il aura à employer.

Le constructeur de piles, par ailleurs, est en premier lieu un ingénieur-mécanicien qui œuvre dans un nouveau domaine. Ses connaissances supplémentaires se composent d'un peu de physique nucléaire, de chimie et de métallurgie et, dans une large mesure, de physique de la pile et de ce que nous appellerons les « techniques de pile ». Puisque son rôle est de transformer des concepts en réalisations concrètes, il faut qu'il allie l'imagination et l'aptitude à concevoir à un sens critique aigu, fondé sur une profonde compréhension de la nature scientifique des choses.

Nous estimons que la meilleure méthode pour former des ingénieurs nucléaires est de recruter des hommes qui ont acquis un premier diplôme dans une branche quelconque de la technique ou de la science * et qui ont également quelque expérience de la pratique, et de leur donner un enseignement ultérieur en deux étapes, à savoir :

Première étape : Des cours conçus destinés à donner une bonne formation générale commune à des hommes de formations différentes. C'est au cours de cette première étape par exemple que les ingénieurs augmenteront leurs connaissances en chimie, métallurgie et physique, tandis que les scientifiques apprendront certaines choses en technique.

Deuxième étape : Des cours sur des sujets précis appartenant au domaine de l'énergie nucléaire. Ce qui constitue la matière de ces cours est, en général, librement accessible, mais il faut également pouvoir prendre connaissance de certaines questions encore tenues secrètes.

Nous avons déjà, à l'Atomic Energy Research Establishment de Harwell, pris un départ sur ces bases.

Dans nos cours sur les piles (Reactor School), qui en sont à la quatrième session, nous donnons à des agents choisis parmi notre personnel ou provenant de l'industrie, des leçons de physique nucléaire, de physique des piles, de métallurgie et d'étude des matériaux, de technique de réalisation de la pile, ainsi que des conférences supplémentaires sur les sujets connexes.

Le temps aidant, nous espérons que cet enseignement sera assumé, dans sa partie non secrète, par les universités et leurs instituts techniques **, ce qui nous permettra de nous concentrer sur les travaux de recherche spécialisée qui sont encore soumis au secret. L'expérience acquise avec ces cours nous montre que c'est dans le domaine de la métallurgie et de l'étude des matériaux que résident les plus grandes difficultés et que les ingénieurs, pour la plupart, disposent d'une formation scientifique insuffisante pour aborder l'étude de ces sujets. L'horizon de bien des ingénieurs-mécaniciens ne s'étend encore guère au-delà de l'acier et de l'eau.

LA FORMATION DES TECHNICIENS EN ÉNERGIE NUCLÉAIRE

La formation des techniciens en énergie nucléaire se poursuit, à l'heure actuelle, principalement en cours d'emploi. Nous espérons voir, en temps voulu, se créer des cours de formation accélérée, des cours à temps partiel ou des cours du soir organisés par des instituts techniques situés près des centres industriels d'énergie atomique. Mis à part un enseignement général élémentaire, ces cours doivent, bien entendu, porter sur des sujets tout à fait

* Constructions mécaniques ou génie chimique, métallurgie ou physique.

** Quelques universités ont organisé à l'aide de conférences des cours de formation accélérée pour diplômés, mais aucune, en Angleterre, n'a mis sur pied un tel enseignement à plein temps.

précis du domaine des techniciens, par exemple l'usage des instruments de mesure, la manutention à distance, la commande à distance, les méthodes de génie chimique, les questions courantes de protection contre les rayonnements.

Nous avons fait à Harwell une expérience qui présente un certain intérêt en créant un atelier spécial où des maîtres-ouvriers sélectionnés avec soin et d'une intelligence supérieure à la moyenne étudient les techniques nouvelles qui sont élaborées dans les laboratoires de recherche et portent sur de nouvelles matières ou de nouveaux problèmes, et essayent de les simplifier afin d'en permettre l'emploi dans un atelier normal. Cette expérience a été fructueuse.

ENTRAINEMENT DU PERSONNEL

L'entraînement du personnel se situe principalement dans le domaine de la surveillance des fabrications courantes, de l'entretien normal des installations, des mesures de prévention contre les dangers des rayonnements, des dispositions à prendre en cas d'accident, et autres questions analogues. L'entraînement est particulièrement important dans les zones où des dangers peuvent survenir. Pour de telles zones, nous avons constaté que les habitudes de discipline et d'obéissance intelligente aux ordres qui caractérisent les anciens marins, étaient de la plus haute valeur. En fait, la discipline exigée n'est pas plus grande que dans de nombreuses entreprises industrielles.

ANNEXE

Au cours de sa session de mai-juin 1954, à Londres, le Commonwealth Engineering Conference a adopté les définitions suivantes :

Ingénieur

Habitué, en raison de sa formation et des enseignements fondamentaux qu'il a reçus, à appliquer la méthode scientifique et à prendre la position d'esprit de l'homme de science, un ingénieur a compétence pour analyser et résoudre les problèmes posés par la technique. Il est apte à assumer une responsabilité personnelle dans l'étude et l'utilisation de la science et des connaissances techniques, notamment dans les domaines de la recherche, de l'étude, de la construction, de la fabrication, de l'organisation générale ou de la direction; il est également capable de former des ingénieurs. Son travail est essentiellement intellectuel et varié et n'a pas le caractère d'un emploi de routine mentale ou d'un travail manuel. Il exige des raisonnements originaux et du jugement, ainsi que l'aptitude à guider le travail administratif et technique d'autres personnes.

Sa formation supérieure doit le rendre apte à suivre, de près et de façon continuelle, les progrès des sciences techniques de sa partie en prenant connaissance des publications nouvelles faites dans le monde entier au sujet des travaux les plus récents; il doit être capable d'assimiler ces informations et de les utiliser avec indépendance d'esprit. Il pourra ainsi contribuer au développement des sciences techniques ou à leur utilisation pratique.

Il aura reçu des enseignements et une formation qui le mettront à même de porter un jugement de valeur, au sens large et général; sur les sciences de l'ingénieur, aussi bien que de connaître, en profondeur, les caractéristiques particulières de sa propre spécialité. Le moment venu, il sera capable de donner avec autorité des avis techniques et d'assumer, dans sa partie, la charge de diriger l'exécution de tâches importantes.

Technicien

Un technicien est une personne qui, assumant ses responsabilités, peut utiliser, soit des techniques éprouvées, normalement accessibles à des spécialistes de l'une des sciences techniques, soit des techniques spécialement prescrites par un ingénieur.

Sous la direction générale d'un ingénieur, ou d'après des techniques connues, il est capable d'accomplir certains travaux parmi ceux qui figurent dans la liste ci-après.

En accomplissant la plupart de ces tâches, il devra surveiller avec compétence le travail exécuté par des maîtres-ouvriers exercés. Les techniques qu'il aura à employer exigent de sa part une expérience acquise et des connaissances dans un domaine particulier des sciences de l'ingénieur; ces qualités doivent être associées à une aptitude marquée à mener une tâche à son terme, dans ses détails, en étant guidé par une pratique bien assise.

Un technicien doit être instruit et formé de manière à lui permettre de comprendre les motifs et les buts des travaux dont il assume la responsabilité.

Les tâches suivantes représentent des tâches types accomplies par des techniciens :

Participation à la conception et à la mise au point d'installations et de constructions de caractère technique; montage et mise en service d'appareils et d'installations; dessin industriel; opinion sur la valeur de constructions ou d'appareillages, leur inspection et leur passage aux essais; utilisation des instruments de mesure; fonctionnement, entretien et réparation de machines, d'installations et d'appareils et repérage de leurs défauts; activités liées à la recherche, à l'étude et à la mise au point, aux essais de matériaux et d'éléments, à la technique de la vente, à l'entretien des appareillages; conseils à donner aux utilisateurs.

L'enseignement théorique et pratique des sciences nucléaires pures et appliquées aux États-Unis d'Amérique

par E. E. Anderson*, R. T. Overman** et F. C. VonderLage*

APERÇU PRÉLIMINAIRE

L'ENSEIGNEMENT DANS LES UNIVERSITÉS ET DANS LES ENTREPRISES INDUSTRIELLES

Un enseignement des sciences nucléaires pures et appliquées, au sens le plus vaste de ces termes, se pratique couramment sur tout le territoire des États-Unis; des centres de formation apparaissent partout où spécialistes en énergie nucléaire ou ingénieurs se réunissent et travaillent ensemble. On organise des colloques, des séries de conférences et des cours abrégés pour des groupes spécialement constitués; presque toutes les installations d'énergie atomique acceptent de donner un enseignement aux employés qu'ils engagent. Certaines des grandes entreprises industrielles qui exploitent des centres de production d'énergie atomique pour le compte du gouvernement ont conclu des accords avec certaines universités pour que leurs employés puissent y prendre des cours supérieurs de sciences pures et appliquées dans le domaine nucléaire, et quelques-uns de ces cours sont même couronnés par un grade universitaire. Aussi bien, presque toutes ces entreprises organisent de temps à autre des cours spéciaux pour la formation de leurs employés, au fur et à mesure des besoins. L'industrie de l'énergie atomique n'est d'ailleurs pas la seule à prendre des dispositions de ce genre. Mais comme les entreprises privées envisagent maintenant la production de l'énergie nucléaire sur une grande échelle, on peut s'attendre à voir l'enseignement technique en cette matière prendre une ampleur sans cesse croissante.

Ce n'est pas, au demeurant, sans une certaine circonspection que les universités américaines, en établissant des programmes d'enseignement des sciences nucléaires pures et appliquées, ont consacré le fait que ces sciences appartiennent à une catégorie spéciale. En effet, depuis la fin de la seconde guerre mondiale, l'adoption de programmes universitaires d'enseignement des sciences nucléaires avait été fort controversé. Actuellement, on est parvenu à un accord à peu près complet sur ce point : les cours de technique nucléaire générale sont réservés aux étudiants ayant déjà obtenu leur premier grade universitaire; pour ceux qui préparent encore leur premier diplôme, on se contente d'élargir les bases de leurs connaissances en science pure et en sciences appliquées élémentaires; en outre, on a fait figurer autant que possible les sciences nucléaires parmi les cours traditionnels de l'étudiant qui se prépare au premier grade universitaire.

Le professeur adjoint Charles E. Dryden, du Department of Chemical Engineering, Université de l'État d'Ohio, a récemment fait une enquête auprès de 142 écoles accréditées d'ingénieurs. 69 pour cent de ces écoles ont répondu au questionnaire. Parmi celles-ci, 15,6 pour cent donnaient un enseignement de génie civil; 35,7 pour cent un enseignement de chimie appliquée; 24,5 pour cent un enseignement d'électricité industrielle; 30,8 pour cent un enseignement de mécanique et 23,2 pour cent un enseignement de métallurgie. Toutes ont indiqué que leurs cours normaux comportaient actuellement certains sujets ayant trait aux sciences nucléaires appliquées. Vingt-trois universités offrent à leurs élèves la possibilité de suivre un ou plusieurs cours spéciaux à l'École d'ingénieurs, et six à la Faculté de physique. Treize autres universités annoncent qu'elles ont organisé des cours sur ces questions après que les programmes de l'année scolaire 1954-1955 ont été imprimés, et quelques-unes d'entre elles ont même fixé un programme plus ou moins complet de cours de sciences nucléaires appliquées. Quelques données statistiques se rapportant à sept de ces universités sont résumées au tableau 1 ***.

Il a fallu un certain temps aux universités pour établir et mettre au point des programmes complets,

---

Original : anglais.

* Oak Ridge National Laboratory.

** Oak Ridge Institute of Nuclear Studies.

*** Dryden Charles E., *Opportunities for Education in Nuclear Engineering*, conférence faite lors de la Réunion des membres de l'Institut américain des Ingénieurs électriciens (American Institute of Electrical Engineers), région centrale de l'Est, à Columbus, dans l'État d'Ohio, le 5 mai 1955.

Tableau 1

Liste des universités et écoles d'enseignement supérieur ayant des programmes d'études spéciales ou ayant institué des cours de sciences nucléaires appliquées

	Université de Columbia	École d'études supérieures de l'État d'Iowa	Massachusetts Institute of Technology	Université de Michigan	Université de l'État de Caroline du Nord	École d'études supérieures de l'État de Pensylvanie	Université de Tennessee
Nombre total d'étudiants ayant suivi des cours portant sur des disciplines nucléaires pendant l'année scolaire 1954-55	100	27	40	Annexe d'Ann Arbor 74 Annexe de Détroit 75	150	13	Environ 200
Nombre de cours ayant trait aux sciences nucléaires pures et appliquées	7	11	7	9	14	2	6
Cours du soir ou cours complémentaires se rapportant aux sciences nucléaires . .	Oui	Non	Non	Oui	Non	Oui	A Oak Ridge
Nombre d'étudiants reçus « bachelors » ès sciences nucléaires en 1955 (approximation)	"	"	"	"	20	"	"
Nombre d'étudiants possédant déjà un grade universitaire qui ont suivi en 1954-55 des cours de sciences nucléaires	90	21	15[c]	11	30	3	—
Nombre d'étudiants[b] ayant obtenu le diplôme de « master » ès sciences nucléaires en 1955 (approximation) .	"	5	10	8	18	"	"
Nombre d'étudiants qui seront reçus « doctors » ès sciences nucléaires en : 1955 . . .	—	—	—	—	3	—	—
1956 . . .	—	—	2	2 à 4	3	—	—

[a] Pas de grade spécial conféré.
[b] Ne comprend pas les « masters » ès sciences de l'Université de Columbia, de l'École d'études supérieures de l'État de Pensylvanie et de l'Université du Tennessee, qui peuvent suivre des cours spécialisés, mais auxquels est conféré un diplôme ordinaire d'ingénieur.
[c] Candidats préparant une thèse de doctorat.

spécialement étudiés pour la formation d'ingénieurs et d'hommes de sciences désireux d'embrasser une carrière en rapport avec l'industrie de l'énergie nucléaire. Pourquoi la mise au point de ces programmes a-t-elle nécessité un tel délai ? Il y a à cela de multiples raisons : tout d'abord, le fait que, par le passé, les recherches ayant trait à l'énergie nucléaire ne pouvaient être faites que dans les laboratoires du gouvernement, sous contrôle de sécurité. D'autre part, les universités ne disposaient pas d'une variété suffisante d'installations nucléaires propres à intéresser tant les professeurs que les étudiants et à les inciter au travail, installations dont le prix de revient est fort élevé. Et enfin, les professeurs capables de faire face aux besoins d'un vaste enseignement de sciences appliquées faisaient en général défaut. En dépit de ces obstacles, de grands progrès ont été réalisés au cours des dernières années; un certain nombre de programmes d'études universitaires sont en formation ou à la mise au point, et quelques-uns ont même dépassé ce stade-là. Il est évident que les industries nucléaires devront, à l'avenir, tâcher de recruter la majorité de leurs techniciens dans les universités. Toutefois, il se produira sans doute dans le cas de cette jeune industrie ce qui s'est produit pour d'autres plus anciennes et plus solidement établies : ce ne seront pas les universités qui se chargeront d'enseigner les méthodes de travail spéciales, propres aux besoins de cette industrie, ou d'instituer des cours techniques sur ces méthodes; ce sera l'industrie elle-même qui devra se charger de cette partie de la formation professionnelle ou, tout au moins, s'entendre à cet égard avec une université pour l'aider dans cette tâche.

*

Les auteurs du présent mémoire ont choisi trois programmes d'études du type en question, établis tous les trois sous l'égide de l'industrie atomique (actuellement représentée par la Commission de l'énergie atomique des États-Unis — United States Atomic Energy Commission). Ces programmes d'études se distinguent de tous ceux dont il est fait mention au début du présent rapport, par les caractéristiques que voici : ce sont des cours officiellement établis; ils sont donnés à heures régulières; ils sont destinés à être répétés; ils sont ouverts à tous les intéressés possédant les connaissances de base requises, sans égard à leurs liens avec certaines entreprises ou écoles; enfin leur but est l'enseignement de sciences ou de techniques spéciales, spécifiques de l'industrie nucléaire. La première partie du présent rapport décrit un cours, d'une durée de quatre semaines, sur la technique de l'usage des isotopes radioactifs; ce chapitre fait également allusion à d'autres programmes d'études apparentés. L'auteur en est Ralph T. Overman, Président de la Special Training Division de l'Institut d'études nucléaires d'Oak Ridge, à Oak Ridge, dans l'État du Tennessee. La seconde partie a trait à l'enseignement de la physique sanitaire et à d'autres programmes d'études connexes; cette partie est due à Elda E. Anderson, directeur de l'enseignement et de la formation pratique à la Health Physics Division du Laboratoire national d'Oak Ridge, établi à Oak Ridge, État du Tennessee. La troisième partie traite de la formation supérieure théorique et pratique en matière de piles atomiques; l'auteur s'est surtout basé sur l'enseignement de l'Oak Ridge School of Reactor Technology; cette école a organisé un cours spécial d'un an ayant trait à la construction des piles atomiques. L'auteur de cette dernière partie est F. C. VonderLage, directeur de l'école annexée au Laboratoire national d'Oak Ridge.

COURS RÉGULIERS, DONNÉS SOUS L'ÉGIDE DE LA COMMISSION DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE DES ÉTATS-UNIS

Première partie :

Enseignement des techniques d'emploi des radioisotopes

Le début de l'étude et de l'emploi des isotopes radioactifs remonte à leur découverte par Becquerel, en 1896. Cependant, le nombre de chercheurs qui s'y consacraient restait limité; il s'agissait essentiellement de certaines personnes qui travaillaient dans quelques centres restreints, surtout dans les laboratoires de certaines universités où l'art et les techniques nécessaires à la manipulation de ces substances se transmettaient de professeurs à étudiants. Les quantités et la variété de ces matières étaient également fort restreintes et leur emploi dans l'industrie et au titre des recherches scientifiques en général, restait dans un cadre très limité. Avec les piles atomiques, une provision aussi abondante que variée de ces matières fit son apparition, et partant, un nombre rapidement croissant, tant des échantillons que des énergies disponibles. Alors qu'on ne disposait, avant 1940, que de quelques microcuries, le Laboratoire national d'Oak Ridge à lui seul avait fait 271 envois, en 1946, pour un total de 8 curies, à 86 institutions. L'expansion rapide qui s'est produite depuis ce temps ressort des chiffres correspondants pour l'année 1954 : à savoir 64 202 expéditions, pour un total de 54 728 curies, à 2 416 institutions.

Cette large distribution d'isotopes radioactifs démontre le développement rapide de l'intérêt parmi les chercheurs scientifiques; mais l'emploi des isotopes ne put connaître, au début, toute l'ampleur attendue, en raison du manque d'instruction suffisante dans les techniques de manipulation de ces produits. Et l'on se rendit compte, bientôt, qu'avec les méthodes classiques d'enseignement en usage dans les universités, on ne pourrait pas instruire à un rythme suffisant le personnel capable de se servir des radioisotopes dans les multiples champs d'application de ces substances.

Enseignement donné par l'Institut d'études nucléaires d'Oak Ridge

L'Institut d'études nucléaires d'Oak Ridge, fondé par 32 universités du Sud des États-Unis pour y donner l'enseignement spécialisé nécessaire, fut l'un des premiers à essayer d'introduire les techniques faisant appel aux isotopes radioactifs dans les domaines scientifiques les plus variés. La Special Training Division de l'Institut a été formée dans l'intention d'organiser un plan régulier d'études des isotopes radioactifs. Ce plan comporte une grande variété de cours rapides, dont la durée s'échelonne entre une et quatre semaines; l'effort principal, toutefois, s'est porté sur l'établissement d'un cours de quatre semaines, sur les aspects fondamentaux du travail avec les isotopes radioactifs. Son but était surtout d'aider les chercheurs les plus évolués à se servir des isotopes radioactifs comme instruments de travail; or, ces savants sont tenus de passer loin de leur laboratoire un laps de temps aussi bref que possible.

On choisit les étudiants destinés à suivre ces cours conformément à l'expérience qu'ils ont des recherches scientifiques et à leurs besoins. En général, ils ont un doctorat ou un grade universitaire équivalent, acquis dans le sujet dont ils sont spécialistes. Le corps enseignant comporte quatre docteurs ès sciences résidant à l'Institut même, ainsi que divers chargés de cours spécialisés appartenant à d'autres sections de l'Institut, au Laboratoire national d'Oak Ridge et au personnel de la Commission de l'énergie atomique. Pour l'enseignement, on fait très largement appel aux films.

Les cours fondamentaux, d'une durée de quatre semaines, se donnent six ou sept fois l'an. Trois d'entre eux se donnent en hiver, entre janvier et avril de chaque année; les cours d'été se donnent

entre juin et septembre. Un petit nombre d'étudiants étrangers a été admis à ces cours depuis 1949. En mai 1955, un cours spécial pour ces étudiants a été donné dans le cadre du programme « Atoms for Peace » (*Les atomes au service de la paix*). En raison du grand intérêt manifesté pour ce cours, il est probable qu'un autre cours spécial pour étrangers sera donné plus tard en 1955. Chaque classe est limitée à 32 étudiants. Le cours de mai 1955 était le quarante-troisième de ceux que la section a organisés depuis sa formation en 1948.

Programme du cours général d'Oak Ridge sur les techniques de manipulation des isotopes radioactifs

Environ la moitié du temps prévu dans chaque cours d'une durée de quatre semaines est consacré aux travaux pratiques de laboratoire. Il est fait usage d'isotopes radioactifs et procédé à l'analyse des résultats expérimentaux. En outre, on organise des conférences sur la théorie, les techniques et l'application des isotopes radioactifs, et des colloques sur les sujets tels que la construction et l'aménagement des laboratoires, la sécurité radiologique et l'emploi des instruments.

Les travaux de laboratoire sont destinés à mettre en pratique les techniques de maniement des isotopes radioactifs; ils n'exigent pas de connaissances spéciales des données scientifiques en question. Le but des expériences est de familiariser les participants avec les caractéristiques du rayonnement, les besoins particuliers du laboratoire, les compteurs nécessaires, et de leur faire comprendre, d'une manière générale, les problèmes et les avantages propres à l'emploi des isotopes radioactifs. Chaque participant exécute des expériences ayant trait à la physique du rayonnement, à sa détection, à son caractère, aux techniques de mesures absolues et relatives de la radioactivité, aux procédés généraux de laboratoire et aux techniques spéciales, telles que la séparation des matières radioactives par les échangeurs d'ions, les études d'échange d'isotopes, l'analyse par activation, la mesure du carbone-14, la préparation d'échantillons biologiques, l'autoradiographie et les techniques de dilution des isotopes. Bien qu'il ne s'agisse pas d'un cours médical, les médecins qui suivent cet enseignement sont invités à se rendre à l'hôpital des cancéreux de la section médicale de l'Institut, pour observer les techniques employées en clinique; mais en aucun cas il ne s'agit d'un cours clinique destiné à ceux qui désirent faire des recherches isotopiques en rapport avec l'être humain. Notons bien, cependant, que ce cours est d'une valeur assez grande pour ceux qui désirent recevoir une instruction générale et qu'il les prépare au travail clinique aussi bien qu'à d'autres travaux scientifiques.

Cours supérieurs et spéciaux

En plus du cours général de quatre semaines, l'Institut a mis au point une série de cours supérieurs ou spéciaux. La plupart d'entre eux durent deux semaines, bien que quelques-uns soient limités à une seule. Ce programme d'études comporte des cours consacrés à l'emploi des isotopes radioactifs en médecine, en biochimie, dans certains instruments, dans l'autoradiographie et dans l'industrie, de même que plusieurs autres cours spécialisés. Chacun de ces cours est répété tous les deux ans, ou plus souvent si le nombre de candidats est assez grand, et en général les cours sont réservés à des étudiants ayant une certaine expérience des isotopes radioactifs. Le but de ces cours est de mettre au courant les élèves des dernières techniques mises au point dans un domaine donné, et de stimuler l'échange de renseignements, d'idées et de suggestions entre les étudiants.

Participation au cours de l'Institut d'Oak Ridge

Les cours se sont répartis sur un total de 62 branches scientifiques. Le tableau 2 donne un résumé des principales matières représentées aux cours de l'Institut entre les mois de juin 1948 et de décembre 1954.

Tableau 2

Domaines scientifiques abordés par les cours de l'Institut d'études nucléaires d'Oak Ridge

Sujet principal	Nombre de branches du sujet en question	Nombre d'étudiants	Pourcentage d'étudiants
Chimie	9	526	27
Médecine	18	692	36
Biologie	15	215	11
Génie civil	12	131	7
Physique	6	210	11
Agronomie	4	28	1
Autres	11	145	7
TOTAL		1 947	100

Les étudiants étrangers, venus de trente et un pays, étaient au nombre d'une centaine au total. On prévoit que d'autres étudiants étrangers seront admis aux cours; mais les demandes doivent être faites au moins six mois avant le commencement du cours que l'étudiant souhaite prendre.

Rôle des isotopes radioactifs dans les plans d'études des universités

Le programme de l'Institut d'Oak Ridge a rempli et continue à remplir une fonction d'une valeur considérable en mettant un enseignement technique général à la disposition de scientifiques ayant la formation préliminaire requise. Néanmoins, les idées que les universités se font de l'enseignement sont nettement différentes de celles qui président au programme intensif d'Oak Ridge. En général,

l'enseignement universitaire ne se borne pas à former les étudiants à des techniques qui ne sont guère qu'une série de manipulations; dans les universités, on présente plutôt ces techniques comme l'aboutissement logique d'un raisonnement qui part de certaines connaissances de base, et l'introduction aux méthodes générales d'expérience est seulement censée mettre l'étudiant en mesure de développer lui-même de bonnes techniques. Mais le programme de formation technique destiné à des scientifiques qui se consacrent déjà à des recherches indépendantes s'écarte nettement des normes de l'enseignement universitaire. On peut dire, en somme, que les universités ont tendance à enseigner les méthodes d'emploi des isotopes radioactifs dans le cadre de leurs cours habituels alors que l'entraînement ultérieur des étudiants ayant déjà reçu un grade universitaire prend la forme d'un enseignement par le travail lui-même.

La plupart des universités donnent des cours de chimie et de physique théoriques; ces cours sont accessibles aussi bien aux étudiants non diplômés qu'aux étudiants déjà diplômés.

Bien souvent, d'ailleurs, les travaux de laboratoire relatifs aux sciences nucléaires prennent place dans le cadre de cours spéciaux de physique et de chimie nucléaires et d'autres sujets. Le tableau 3 donne un aperçu des divers cours donnés à Oak Ridge sur les problèmes et les techniques des sciences nucléaires, cours qui ont été fréquentés par des étudiants provenant d'environ cinquante écoles d'enseignement supérieur et universités.

Tableau 3

Cours complets portant sur des sujets spécifiques relatifs aux sciences nucléaires, fréquentés par des étudiants provenant de 50 universités des États-Unis d'Amérique

Discipline	Nombre total des cours organisés
Chimie	37
Physique	35
Médecine	14
Biologie	11
Génie civil	8
Biochimie	1
Autres	4
Recherches ayant trait aux isotopes radioactifs	48

A part les universités où sont donnés des cours de radiologie ou de physique sanitaire, telles que celles mentionnées dans la deuxième partie du présent rapport, la plupart des établissements d'enseignement supérieur ont, d'une manière ou d'une autre, ajouté certains sujets à leurs cours : par exemple, on inclut à ces cours une ou plusieurs expériences concernant l'étalonnage des instruments; ou des expériences d'un autre genre sont adjointes à un cours au laboratoire nucléaire; on les considère alors comme une partie du travail à faire à l'occasion de ces cours de laboratoire, ou comme une partie des programmes de recherches pour étudiants diplômés.

Autres programmes spécialisés d'instruction technique, concernant les isotopes radioactifs

Il existe aux États-Unis d'Amérique un assez grand nombre de programmes destinés à l'instruction du personnel scientifique chargé de recherches particulières. En effet, une solide formation générale n'est pas indispensable pour effectuer certaines expériences courantes avec les isotopes radioactifs. Ces programmes appartiennent à trois catégories. La première comporte les programmes d'instruction clinique, destinés à former des médecins capables d'un diagnostic donné; par exemple, l'étude de la fonction thyroïdienne au moyen de l'iode-131. Des cours de ce genre sont donnés à l'hôpital du comté de Cook, dans l'État d'Illinois, et à l'École de médecine de l'Université Emory à Atlanta, dans l'État de Georgie. Jusqu'à présent, on n'a pas pu établir complètement la valeur de ces cours. D'autre part, un certain nombre d'entreprises industrielles donnent des cours spécialisés enseignant l'usage de certains dispositifs ou sources de rayonnement; ainsi, on y apprend l'emploi de sources de haute intensité en radiographie, ou de sources propres à mesurer les épaisseurs. Il existe au moins deux universités qui organisent des cours complets de ce genre sur le modèle d'un cours analogue donné à Oak Ridge. Ce sont l'Université Purdue (à West Lafayette, dans l'État d'Indiana), qui organise un cours d'été d'une durée de deux semaines pour le personnel industriel, et l'Université Rutgers (dans l'État de New Jersey) où un centre d'instruction a été établi en collaboration par les industries et par l'Université. Nombre de laboratoires, qui se chargent de renseigner le public, sont également qualifiés pour donner une instruction spécialisée dans ce domaine.

Deuxième partie : Enseignement théorique et pratique de la physique radiologique

Après la guerre, par suite de l'expansion rapide du domaine nucléaire, la Commission de l'énergie atomique des États-Unis (AEC) et les entreprises qui travaillent pour elle sous contrat, de même que l'industrie, les hôpitaux, les services de la santé publique et les universités, eurent un grand besoin de personnes qualifiées dans la protection contre le rayonnement, c'est-à-dire de physiciens sanitaires expérimentés ou d'ingénieurs spécialisés dans la sécurité radiologique. Pour faire face à cette demande, l'AEC établit en 1948 un cours pour étudiants en physique radiologique au Laboratoire national d'Oak Ridge, à Oak Ridge, dans l'état de Tennessee, et à l'Université de Rochester, à Rochester,

dans l'État de New York. Le programme était dirigé par le National Research Council (Conseil national de recherches). Au printemps de 1950, il fut décidé de transférer l'enseignement ayant trait au programme d'Oak Ridge dans une université où les étudiants auraient l'assurance de voir les cours suivis par eux leur donner accès à un grade universitaire supérieur; l'Université Vanderbilt à Nashville, dans l'État de Tennessee, fut choisie à cet effet comme école associée au Laboratoire national d'Oak Ridge. A la même époque, le Laboratoire national de Brookhaven, à Upton, dans l'État de New York, prit la charge des cours de physique sanitaire appliquée enseignés jusqu'alors à Rochester. Lorsque le rôle du Conseil national des recherches prit fin, la direction des études fut confiée à l'Institut d'études nucléaires d'Oak Ridge. Au début de l'année 1953, afin de remédier plus amplement au manque de physiciens sanitaires expérimentés, un troisième centre fut établi; situé sur la côte du Pacifique, ce centre est divisé en deux : l'enseignement théorique est donné à Seattle, à l'Université de Washington, dans l'État du même nom, et les travaux pratiques se font aux Hanford Engineering Works.

Dans ses applications pratiques aux mesures de protection à prendre dans l'industrie et au laboratoire, la physique sanitaire comporte environ 99 pour cent de physique, de chimie et de questions de génie civil, et environ 1 pour cent de biologie; il est donc essentiel que les étudiants soient choisis parmi ceux qui préparent un premier grade universitaire et qui ont pris pour sujets principaux de leurs études la physique, la chimie ou le génie civil avec les mathématiques, la biophysique ou un autre sujet du même genre à titre complémentaire.

La Fondation de physique radiologique de l'AEC est destinée à former des physiciens sanitaires débutants. C'est à ceux-ci que sont confiées les questions de surveillance du rayonnement et des appareils de contrôle, en dehors des mesures de vérification courantes, et qu'incombe la responsabilité d'assurer la protection contre le rayonnement dans un laboratoire universitaire, un hôpital, une petite usine ou un laboratoire de recherches. Ils peuvent exercer les fonctions d'inspecteur de physique sanitaire dans un établissement plus important qui exige un personnel de surveillance plus nombreux. Pour être admis, il faut avoir reçu au minimum une année complète de formation après avoir obtenu un diplôme équivalent au grade de « master » (licencié) d'une université.

L'étudiant suit pendant l'année scolaire, un cours universitaire du niveau de la licence. Le programme des études est conçu de manière à lui donner de solides connaissances en physique atomique et nucléaire, en accordant une attention spéciale à l'interaction du rayonnement et de la matière, un fonds de connaissances biologiques spécialisées et les connaissances nécessaires en électronique et en mathématiques. Il s'agit là des études préparant à l'ensemble de ce qui constitue la théorie et la pratique de la physique sanitaire. Pour ne citer que les sujets essentiels, ce cours de physique radiologique comporte l'étude générale des dangers de l'irradiation, des principes de mesure des rayonnements ionisants, des instruments, des méthodes de protection, des techniques de surveillance du personnel et du milieu (air, eau, boue, plantes, animaux, sol), de l'inspection des bâtiments (niveaux de rayonnement, pollution de l'air et des surfaces contaminées), de l'aménagement des locaux ainsi que de l'outillage destiné à la manutention des matières radioactives, enfin le calcul des grandeurs qui interviennent en physique sanitaire (dimensions des écrans, limites de tolérance des matières radioactives dans le corps, l'air, l'eau, etc., doses de rayonnement émises par les sources externes et internes). Bien rares sont en général ceux qui ont une connaissance suffisante de toutes ces questions. A l'Université de Washington et à l'Université Vanderbilt, le cours théorique et pratique de physique sanitaire est enseigné par des membres de la Section de physique sanitaire des organismes relevant de l'AEC.

Après avoir terminé un cycle scolaire normal de trois trimestres à l'université, les étudiants passent le reste de l'année à l'un des centres suivants associés à l'AEC : Hanford Engineering Works, Laboratoire national de Brookhaven ou bien Laboratoire national d'Oak Ridge, où ils se perfectionnent en physique sanitaire appliquée sous la direction de praticiens. Dans ces centres, les techniques de protection contre le rayonnement sont mises en œuvre sous tous leurs aspects sur le plan industriel, au moyen des méthodes les plus modernes.

Le but de ce stage pratique est d'enseigner à l'étudiant l'art d'appliquer ses connaissances théoriques à la grande diversité de problèmes pratiques que le physicien sanitaire rencontre tous les jours au cours de sa carrière. Dans l'exercice de sa profession, il devra en effet résoudre des problèmes concernant la destruction de déchets radioactifs, tant à grande qu'à petite échelle; il aura à faire de petites réparations et à étalonner des instruments; il lui faudra savoir résoudre des problèmes de décontamination, surveiller la mise en œuvre des méthodes ordinaires de contrôle du rayonnement et tenir à jour les dossiers qui s'y rapportent. Il devra s'imposer et se montrer capable de parler avec l'autorité que seule confère l'aptitude à résoudre des problèmes grâce à ses connaissances et à son expérience; il lui faut être diplomate en même temps, car il risque de se trouver le seul physicien sanitaire en service dans une université, un hôpital ou un laboratoire de recherches.

Pour un petit nombre choisi d'étudiants, les cours sont prolongés de six mois, en fin d'année, ce qui les met en mesure d'obtenir un diplôme de « master » (licencié). En général, il faut, pour accéder à ce grade, que l'étudiant traite personnellement un problème de recherches, ce qu'il peut faire à l'université ou au laboratoire associé. C'est parmi ces

étudiants qu'après encore des années d'expérience seront recrutés les spécialistes et le personnel supérieur des services de sécurité auxquels on confie l'exécution de l'ensemble des mesures de sécurité dans de grandes usines ou entreprises.

Le tableau 4 fait connaître les fonctions actuellement remplies par les étudiants de l'AEC qui ont terminé leur programme d'étude avant 1955.

Tableau 4

Fonctions actuelles des étudiants en physique radiologique de l'AEC qui ont terminé leurs études

Physique sanitaire (à l'AEC)	63
Physique sanitaire (en dehors de l'AEC)	29[a]
Emplois où il est fait usage de la physique sanitaire	5
Suivent un cours de perfectionnement .	49[b]
Enseignement ou recherche non industrielle	10
Emplois industriels en physique	10
Forces armées	6
Ne travaillent pas ou n'ont pas fourni de renseignements sur leurs occupations .	8
Ont abandonné en cours d'étude. . . .	6

[a] Les institutions extérieures à l'AEC comprennent : des universités, le service de la santé publique des États-Unis et les laboratoires militaires.

[b] En forte proportion, les étudiants qui poursuivent leurs études se consacreront à la physique sanitaire ou à une activité connexe. Quelques-uns d'entre eux ont déjà occupé à titre intérimaire des postes de physicien sanitaire.

Autres programmes de physique sanitaire

Aux États-Unis, il existe d'autres programmes d'instruction portant sur certains aspects de la sécurité radiologique. Quelques conférences, à la Oak Ridge School of Reactor Technology (ORSORT), ont pour but de donner à ceux qui étudient la technologie des piles quelques idées sur les principes de la physique sanitaire.

Le cours de technique des piles, professé à l'École d'études supérieures de l'État de Caroline du Nord, comporte deux séries de conférences de physique sanitaire qui traitent des méthodes générales de protection, des expositions au rayonnement tolérables, du calcul des doses de rayonnement et des écrans de protection, enfin des procédés de surveillance et de contrôle; le futur ingénieur en sciences nucléaires reçoit de la sorte les connaissances et les renseignements nécessaires pour pouvoir travailler en toute sécurité sur les piles et les produits qui y sont engendrés.

Le Département de la santé, de l'instruction publique et de la prévoyance sociale des États-Unis organise un programme d'enseignement radiologique sanitaire visant à attirer l'attention des fonctionnaires de la santé publique sur l'importance des rayonnements ionisants, sur la contamination du milieu, sur les risques professionnels auxquels sont exposés ceux qui mettent en œuvre ces radiations, enfin sur la meilleure manière de se protéger contre de tels risques ou tout au moins de les réduire à un minimum. Ce programme est destiné, au premier chef, au personnel professionnel des sections du service de santé des États et des municipalités; il comprend les cinq cours suivants : *a*) un cours général (deux semaines); *b*) un cours sur l'aménagement sanitaire du milieu au point de vue radiologique (deux semaines); *c*) un cours de protection radiologique à l'usage des professionnels (deux semaines); *d*) problèmes de la radioactivité dans les usines hydrauliques (cinq jours); *e*) hygiène du rayonnement; aspects médicaux préventifs (quatre jours).

Ces cours sont professés au Centre de technique sanitaire Robert A. Taft, à Cincinnati, dans l'État d'Ohio; de même, en divers autres lieux, se donnent quelques cours d'instruction sur place, en nombre restreint.

Enfin, plusieurs écoles de santé publique ont récemment institué des cours de protection contre les rayonnements, lesquels peuvent être choisis comme sujet principal pour l'obtention d'un diplôme universitaire.

Troisième partie : Enseignement de la construction et de la technique des piles atomiques

L'industrie nucléaire est une entreprise d'une grande complexité technique. La réalisation d'une centrale nucléaire suppose une technologie qui embrasse une grande partie des subdivisions classiques des sciences pures et appliquées, en plus de celle propre au domaine nucléaire proprement dit; elle exige donc la collaboration d'ingénieurs et de techniciens spécialisés dans des domaines assez divers. Chacune des disciplines traditionnellement enseignées aux étudiants en sciences pures et appliquées comporte une certaine part de la technologie applicable aux piles nucléaires. Or, afin que le travail d'une équipe soit efficace, il est essentiel que quelques-uns de ceux qui se spécialisent dans la construction des piles aient reçu une formation complémentaire portant sur tous les aspects de la technologie des piles; c'est à ce prix qu'ils pourront non seulement accomplir leur propre tâche dans les meilleures conditions possibles, mais encore assumer la responsabilité de diriger leurs collaborateurs dans des domaines plus vastes que ceux sur lesquels porte l'enseignement traditionnel des sciences appliquées.

En mars 1950, la Commission de l'énergie atomique des États-Unis a créé l'École de technologie des piles d'Oak Ridge (Oak Ridge School of Reactor Technology, ORSORT) au Laboratoire national d'Oak Ridge, dans l'État du Tennessee. Cette école a pour but de former des ingénieurs qui, comme nous venons de le dire, doivent avoir des connaissances

sur la technique des piles atomiques sous tous ses aspects. A cet effet, le plan des études consiste à faire un amalgame de sujets qui sont normalement séparés dans l'enseignement traditionnel auquel les étudiants ont été soumis jusque-là. Tous les étudiants suivent un même cours et le principe de l'enseignement est de donner de solides connaissances générales sur la technologie des piles, plutôt que de former des spécialistes dans tel ou tel de ses aspects.

L'école s'est fixé une tâche bien déterminée et volontairement limitée; elle se consacre à la technologie des piles, et non pas à la science pure, bien que les notions de science pure soient enseignées lorsqu'il le faut pour faire comprendre la technologie. C'est une école d'application; elle s'attache à former des étudiants qui vont construire et exploiter des piles atomiques et non des étudiants qui vont poursuivre leurs études universitaires. S'il en est parmi eux qui désirent préparer un diplôme universitaire supérieur, il leur est conseillé de l'obtenir avant d'entrer à l'école.

Ce qui montre bien le caractère d'école d'application de l'ORSORT, c'est que l'on y enseigne l'art de l'ingénieur. Le plan d'études comporte trois phases, et on passe de l'une à l'autre progressivement.

Au cours de la première phase, chaque étudiant doit acquérir une sorte de catalogue mental des connaissances et de l'expérience dont l'ensemble constitue la science et la technologie des piles. Il s'agit d'une sorte de table des matières des sujets, aussi complète que possible; ce catalogue représente en somme l'ensemble des outils de l'ingénieur des bureaux d'études.

Dans la seconde phase d'instruction, des spécialistes expliquent comment peser les données d'un problème technique donné, comment le décomposer de manière à pouvoir appliquer des principes techniques à chacun de ses éléments, enfin, comment choisir dans le catalogue que nous avons évoqué tout à l'heure, les outils technologiques à utiliser pour aboutir à une solution satisfaisante. Cette seconde phase imprègne en quelque sorte tous les cours faits en salle de classe, mais elle est surtout réservée aux trois derniers mois du cours de technologie des piles, qui sont consacrés à des conférences faites par des ingénieurs expérimentés sur un grand nombre de piles déjà construites ou en construction.

Les étudiants passent par la dernière phase de l'instruction pendant les dix dernières semaines du cours. Durant cette période, on constitue des groupes dont chacun doit étudier la possibilité de construire un système de pile d'un type donné; ces groupes ont une composition analogue à celle des équipes professionnelles; ils doivent, sous forme de « thèse » établir un rapport du même genre que les rapports professionnels habituels. Bref, l'école s'efforce de former des diplômés qui ont reçu une instruction en règle dans la technologie des piles et qui sont bien préparés à se trouver aux prises avec la pratique.

Le cycle des études de l'ORSORT, qui dure un an, est ouvert à tous ceux qui se sont distingués dans leurs études universitaires et sont au moins titulaires du diplôme de bachelier d'une université. Avec le système d'enseignement américain, l'étudiant satisfait en général aux conditions minima exigées à l'âge de vingt-deux ans. Beaucoup d'étudiants de l'ORSORT obtiennent le grade de « master » (licencié) — après un ou deux ans d'études supplémentaires — et quelques-uns d'entre eux ont obtenu celui de docteur — après trois à quatre années d'études supplémentaires. Certains des étudiants viennent directement des universités; d'autres avaient déjà une expérience professionnelle d'une à trente années. De toute façon, l'enseignement déjà reçu ou l'expérience déjà acquise portaient sur l'une des branches classiques des sciences pures ou appliquées. En d'autres termes, le groupe d'étudiants fréquentant un cours donné est hétérogène quant à l'âge, l'expérience et la formation préalable.

Il y a peu d'étudiants qui aient déjà une formation de base suffisamment vaste dans les sciences classiques pures et appliquées pour pouvoir suivre d'emblée un cours supérieur de technologie des piles, sans qu'il faille revenir et insister sur certains principes généraux. La nécessité de faire un retour en arrière sur les matières de base, tout en observant un programme étroitement limité dans le temps, a conduit l'ORSORT à adopter ce stratagème pédagogique qui consiste à mélanger l'enseignement des principes de base à celui de la technologie, au lieu d'enseigner les principes d'abord et la technologie ensuite, comme on fait d'habitude. La méthode a très bien réussi, car les élèves à qui elle s'adresse ont atteint une maturité intellectuelle telle qu'ils commencent à ne plus admettre d'apprendre les données fondamentales sans égard à leur application. Au contraire, si les principes de base leur sont exposés au moment nécessaire, leur intérêt et leur désir de s'instruire se trouvent stimulés.

Le succès obtenu dans cet enseignement simultané des principes théoriques et des applications pratiques en un seul et même cours de technologie a incité les dirigeants de l'école à s'éloigner encore plus de la tradition en établissant leur plan d'études. Dans les cours de l'ORSORT, on n'a rien fait pour établir des cloisons étanches entre les diverses branches de la construction ou de la technologie des piles; on n'hésite pas, bien au contraire, à faire figurer une question qui se rattache à une branche donnée de la technique dans un cours consacré en principe à une toute autre branche, s'il doit en résulter un rapprochement entre cette question et son application.

Tous les étudiants suivent le même programme, sans égard à leur formation technique préalable. Les cours durent un an et sont menés à vive allure. Les neuf premiers mois se passent dans la salle d'études, et ils sont suivis par dix semaines de travail continu pour la préparation d'une thèse

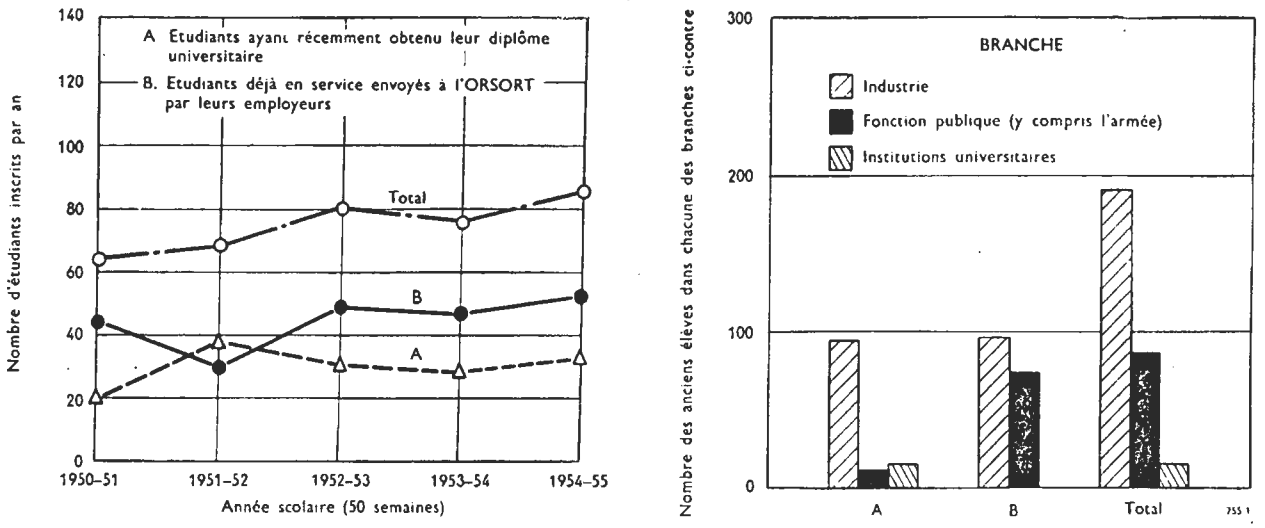


Figure 1. — Statistiques relatives à l'ORSORT (Oak Ridge School of Reactor Technology).

pendant l'été. Pour l'année scolaire 1954-1955, le travail se répartissait entre les cours suivants :

Physique des piles atomiques . . .	30	heures
Étude analytique des piles atomiques	180	»
Colloques sur les piles atomiques .	30	»
Discussions	30	»
Matières employées dans les piles. . .	72	»
Chimie et technologie chimique des piles	56	»
Technique des piles	80	»
Laboratoires de physique des piles . .	30	»
Technologie des piles :		
Introduction historique	6	»
Protection contre le rayonnement .	25	»
Instruments et commandes	15	»
Construction et fonctionnement des centrales	42	»
Visites d'intallations	50	»
Thèse (en été)	10	semaines de travail ininterrompu

On trouvera une description détaillée des cours dans la brochure TID-5261, qui a été mise à la disposition des délégués de la Conférence de Genève. Le manuel du cours de laboratoire existe également sous le numéro TID-5262, de même que des notes prises en salle d'étude sur les principes de chimie nucléaire, sous le numéro TID-5260.

L'ORSORT, du point de vue administratif, est une section du Laboratoire national d'Oak Ridge; son personnel se compose d'un directeur, de cinq professeurs permanents qui constituent le « noyau » du corps enseignant, et d'un certain nombre de fonctionnaires chargés de l'administration et du secrétariat. L'école a son propre bâtiment, avec les laboratoires destinés aux étudiants. Elle se trouve en contact intime avec les recherches et travaux sur les piles, effectués au Laboratoire national d'Oak Ridge; elle fait largement appel aux services du personnel expérimenté de ce laboratoire pour diriger les travaux des groupes, pour faire des conférences et organiser des colloques sur des sujets spéciaux que l'on introduit de temps en temps dans les cours. Chacun des professeurs, ainsi que le directeur, aidé parfois par un adjoint temporaire, est chargé d'un cours dont il organise le programme et pour lequel il prépare les problèmes à poser aux étudiants ainsi que les examens; en plus de ses conférences, il surveille la continuité, l'homogénéité et la stabilité de l'enseignement. Le corps enseignant collabore étroitement avec des conférenciers de passage, pour assurer l'unité de la présentation dans l'enseignement et dans le programme d'études en général.

En septembre 1955, 151 étudiants ayant récemment obtenu un diplôme universitaire et 224 techniciens déjà en fonction et détachés à l'école par leurs employeurs termineront leurs cours. La figure 1 montre le nombre des étudiants qui ont suivi les cours de l'ORSORT et leur situation actuelle, depuis l'ouverture de l'école. Pour l'année 1950-1951, les données se rapportent à la fois à ceux qui ont suivi le cours provisoire qui a commencé en mars 1950 (au nombre de vingt employés) et à la première promotion normale, dont le cours a débuté en septembre 1950.

L'expérience acquise à l'ORSORT pendant les cinq premières années de son existence nous conduit à formuler sur une école de ce genre les conclusions suivantes :

1. Le succès de l'école est indubitable. Les employeurs ne demandent qu'à y faire entrer leur personnel, bien qu'il y ait des frais de scolarité de 2 500 dollars à payer. Les anciens élèves sont vivement recherchés, et un grand nombre de diplômés de l'ORSORT occupent, dans l'industrie nucléaire, des situations dont l'importance n'est pas en rapport avec leur âge.

2. Si on prend soin de choisir des étudiants bien doués, qui ont obtenu leur premier diplôme universitaire après avoir fait des études scientifiques, théoriques ou pratiques, selon le programme classique, on parvient, dans le cadre d'un cours d'un an, à les former à toute la technologie, pourtant bien vaste, des systèmes nucléaires et à les rendre aptes au calcul des piles. Pour ce faire, il faut établir un programme d'études détaillé, intensif et accéléré, où le temps sera utilisé au mieux par une présentation judicieuse des sujets traités.

3. Un technicien qui ne possède que le premier diplôme universitaire, qui n'a pas encore d'expérience mais qui a passé par l'ORSORT, doit être en mesure de faire l'avant-projet d'une pile atomique. Après quelques études et une expérience supplémentaire, il pourra mettre au point les améliorations de détail desquelles sortira le projet d'une installation effectivement réalisable.

4. L'hétérogénéité des étudiants quant à l'âge, l'expérience et la formation est à la fois un avantage et un inconvénient; ils ont beaucoup à apprendre les uns des autres lorsque leurs origines sont très diverses.

5. Nous estimons que la meilleure instruction que peut recevoir un ingénieur qui doit connaître les divers éléments des piles lui est donnée dans un cours qui traite du fonctionnement et de la construction des centrales nucléaires.

6. L'ORSORT étant situé sur le terrain d'un laboratoire où l'on poursuit les recherches les plus avancées au sujet des piles atomiques, l'enseignement y est donné avec une compétence et une maîtrise qu'il serait difficile de trouver si cette école n'était qu'une annexe d'un autre établissement d'enseignement.

Le plan établi sous le titre « Atoms for Peace » *(Les atomes au service de la paix)* a fait ressortir la nécessité d'une seconde école à l'ORSORT; aussi la Commission de l'énergie atomique des États-Unis a-t-elle récemment établi l'École des sciences et techniques nucléaires (School of Nuclear Science and Engineering) au Laboratoire national d'Argonne, près de Lemont, dans l'État d'Illinois. Le premier cours a eu lieu en mars 1955, avec trente étudiants étrangers, plus neuf étudiants venant de l'industrie américaine. L'ambiance de l'école d'Argonne est semblable à celle de l'ORSORT et de façon générale, ses cours traitent les mêmes sujets. Cependant le but et la direction des deux écoles sont quelque peu différents sous certains rapports.

A l'école d'Argonne, les cours sont plus variés et certains ne diffèrent entre eux que par leur niveau; les travaux pratiques y ont une plus grande importance. Toutefois, la différence la plus notable réside dans le fait que les étudiants d'Argonne ont un plus large choix de cours à suivre; l'école d'Argonne est également conçue de manière à recevoir des étudiants qui désirent consacrer leur temps à se perfectionner dans les disciplines scientifiques classiques, pures ou appliquées, y compris les applications à l'énergie atomique. L'école d'Argonne n'est pas aussi strictement réglementée que l'ORSORT et les exigences d'admission n'y sont pas, de manière générale, aussi sévères.

L'enseignement et la formation professionnelle en matière d'utilisation de l'énergie atomique dans les domaines de la santé et de la médecine

par l'Organisation mondiale de la santé

La découverte de l'énergie nucléaire est riche de promesses pour l'avenir de l'humanité. Nombreux sont notamment les bienfaits que l'on peut en attendre dans les domaines de la médecine et de la santé publique. Toutefois, aux espoirs qu'on est en droit de fonder sur l'exploitation des forces nucléaires se mêle le sentiment de la complexité des nouveaux outils qu'il s'agit de mettre de plus en plus au service de l'homme. Si l'on veut développer l'emploi des substances radioactives, il est donc indispensable de bien former un personnel capable de les utiliser.

Le présent exposé traite des personnes à qui il y aurait lieu de donner cette formation et s'efforce de préciser le contenu de l'enseignement en question et les établissements qui devraient le dispenser. Comme il s'agit d'un domaine où les progrès sont très rapides, toute classification de ce genre a nécessairement un caractère à la fois provisoire et incomplet. Il est évident que la production, la manipulation et l'élimination des substances radioactives, de même que l'utilisation des piles atomiques, appellent la création d'une ou de plusieurs professions nouvelles, mais il est non moins évident qu'une immense lacune s'est brusquement révélée dans les connaissances actuelles du corps médical et des professions apparentées.

Dans la deuxième partie de cet exposé, on s'est efforcé de rapprocher du programme d'enseignement et de formation professionnelle de l'OMS les besoins présents dans le domaine considéré et d'indiquer comment l'Organisation pourrait aider les pays à résoudre leurs problèmes à cet égard. En dernier lieu, l'OMS a réuni, à titre d'exemple, quelques renseignements sur diverses initiatives prises dans différents pays en ce qui concerne cette formation particulière : ces renseignements se trouvent résumés en annexe.

ASPECTS CLINIQUES : DIAGNOSTIC ET THÉRAPEUTIQUE

En médecine, l'application des découvertes scientifiques au soulagement des maux dont souffre l'humanité comporte toujours l'adjonction de connaissances nouvelles à l'équipement intellectuel du médecin*. L'étudiant en médecine, le médecin et le spécialiste sont les grandes catégories qu'il y a lieu de considérer ici.

L'étudiant en médecine

Il incombe à l'école de médecine d'inculquer au futur médecin un ensemble de notions générales sur la nature de la radioactivité et sur son rôle en biologie et en médecine. C'est dans les études préclinques qu'il convient d'inclure cet enseignement, pour que l'étudiant soit à même de comprendre la nature de cette force physico-chimique et ses effets sur les systèmes biologiques. L'emploi des substances radioactives, soit comme moyens de diagnostic, soit comme armes thérapeutiques, peut être enseigné au cours des études cliniques. Certaines informations pourront être données sur la manipulation des substances radioactives et sur les risques que leur emploi comporte, mais cela n'implique pas que l'étudiant en médecine deviendra de ce fait expert en la matière ou aura même simplement compétence pour utiliser ces substances, pas plus qu'un cours de chirurgie ne suffit à former un chirurgien.

Comme, dans la collectivité où il exerce, le médecin est une source importante de renseignements autorisés sur les questions de médecine et de santé, l'étudiant doit être préparé à remplir son rôle futur à cet égard. Les effets possibles que peut exercer sur la collectivité la contamination résultant de l'emploi des substances radioactives dans les établissements industriels et dans les hôpitaux lui seront présentés par le Département de médecine préventive et sociale, qui lui donnera également une idée des utilisations éventuelles de l'énergie nucléaire dans le domaine de la santé publique. Le Département de psychiatrie aura pour tâche de faire comprendre à l'étudiant les réactions individuelles de l'être humain à l'égard de conceptions répandues

Original : anglais.

* Ceci s'applique non seulement au corps médical, mais à d'autres professions apparentées (dentistes, vétérinaires, etc.), bien que ces dernières ne fassent pas l'objet d'une discussion distincte dans le présent exposé.

qui, dans certains cas, seront de fausses interprétations de forces inconnues. En outre, les effets génétiques d'une exposition aux substances radioactives comportent un élément affectif auquel le médecin doit être en mesure de faire face, étant donné les responsabilités qui lui incombent du point de vue de la santé mentale de la collectivité. L'étudiant en médecine doit être initié à tous ces sujets, encore imparfaitement définis pour l'instant, de manière à être prêt à jouer le rôle que la société attendra de lui. La coordination interne de ce programme sera laissée aux soins de chaque établissement d'enseignement médical, qui l'organisera comme il l'entend.

Le médecin (connaissances générales)

Un problème qui se rencontre toujours est de porter à l'attention de ceux qui ont dépassé le stade des études universitaires les renseignements estimés nécessaires sur les nouvelles découvertes. La publication d'articles dans les journaux professionnels tend à fournir une réponse à ce problème, mais le praticien surchargé de travail, dont l'énergie et le temps sont absorbés par sa clientèle, a rarement la possibilité de s'instruire systématiquement de lui-même par la lecture des périodiques. Une méthode plus efficace consiste à organiser des réunions, des séminaires, des conférences, de brèves séries de cours, etc., à l'occasion desquels certaines connaissances générales de médecine nucléaire (puisque tel est le sujet qui nous occupe) peuvent être données aux médecins. Ces cours de perfectionnement peuvent être institués sous l'égide d'associations professionnelles, d'établissements d'enseignement ou d'institutions gouvernementales ou autres.

Dans des cours de ce genre, dont la durée peut varier depuis un simple week-end jusqu'à plusieurs semaines, les buts à atteindre devraient être les mêmes que ceux qui ont été exposés à propos de l'étudiant en médecine, sous réserve toutefois que les questions cliniques soient traitées de façon plus approfondie. Il faut en profiter pour revoir les questions fondamentales de chimie et de physique qui interviennent en l'occurrence, mais on peut réduire à un minimum, voire omettre complètement, le détail de la manipulation des substances radioactives. D'autre part, il convient de faire connaître les risques que comporte l'emploi des substances radioactives, notamment pour les malades et pour le personnel exposés aux radiations.

Le médecin qui se spécialise dans l'emploi des isotopes à des fins diagnostiques et thérapeutiques

Pour le personnel de cette catégorie, il faut insister sur les méthodes de manipulation des substances radioactives et la formation dispensée à cet égard doit être organisée sur des bases systématiques, avec délivrance de certificats par les autorités compétentes. Il convient d'enseigner au futur spécialiste les éléments de la physique nucléaire, la radiobiologie, les techniques instrumentales de manipulation des substances radioactives, les risques qui en résultent et les mesures de protection à prendre. Le cours peut être institué sous l'égide d'une école de médecine, et il faut organiser, une fois que les études théoriques sont achevées, un stage dans un centre agréé où le candidat acquerra une expérience pratique dans les conditions normales de travail. Comme beaucoup de pays n'ont pas les moyens de mettre sur pied un tel système de formation, il faut prévoir des bourses d'études à l'étranger.

SANTÉ PUBLIQUE ET MÉDECINE PRÉVENTIVE

Les questions de santé publique que pose l'énergie nucléaire ont des conséquences très vastes et toujours plus nombreuses, que le personnel sanitaire, aussi bien à l'échelon administratif que dans l'industrie, se doit de comprendre. On ne mentionnera ci-après que trois grandes catégories de personnel, bien que d'autres groupes, tels que les infirmières de la santé publique et les éducateurs sanitaires, aient un rôle important à jouer à cet égard.

Le médecin de la santé

Les écoles de santé publique ou les instituts d'hygiène devraient prendre des mesures pour inclure, dans la formation des médecins de la Santé ainsi que d'autres membres du personnel sanitaire, un enseignement approprié sur la nature des radiations ionisantes et sur les mesures de protection qui s'imposent. Ce cours devrait comprendre également des éléments de physique nucléaire pour permettre au médecin de la Santé de comprendre les effets de la pollution radioactive (de l'air, des bâtiments, de l'eau, etc.) résultant aussi bien d'accidents dans le fonctionnement des piles atomiques que de l'emploi de substances radioactives dans les industries, les hôpitaux, etc., sans précautions suffisantes. L'élimination des déchets atomiques ne manquera pas de devenir une question d'intérêt public et le médecin de la Santé sera appelé à donner des avis sur ce point, y compris par exemple sur l'inhumation ou l'incinération des corps de malades qui ont été exposés à des substances radioactives. L'emploi de radiations pour stériliser les aliments et les médicaments (vaccins, sérums et autres produits biologiques) doit figurer dans l'enseignement ainsi dispensé, bien que les techniques appliquées à cet effet peuvent être passées sous silence. Il est évident que ces questions rentrent dans le cadre des sujets généralement enseignés par les écoles de santé publique et peuvent être par conséquent introduites dans les programmes actuels. Pour les médecins de la santé publique qui, exerçant actuellement, ont reçu leur formation avant la découverte de ce domaine nouveau, des cours de perfectionnement devraient être organisés par les écoles de santé publique, les institutions gouvernementales et les centres d'énergie atomique.

L'ingénieur sanitaire

Il convient d'enseigner les mêmes sujets au personnel de cette catégorie en insistant davantage sur les méthodes pratiques de détection et de protection. Cette remarque s'applique à la pollution du milieu par les substances radioactives, à l'élimination des déchets radioactifs (dans le sol et dans l'eau), à la décontamination, au filtrage de l'air et à la ventilation, à la stérilisation des aliments (y compris peut-être les méthodes les plus récentes de traitement du lait et de l'eau), aux méthodes de détection, etc. Pour les ingénieurs sanitaires déjà en fonctions et qui ont reçu leur formation avant que ce domaine nouveau n'ait été découvert, des cours de perfectionnement peuvent être organisés par les institutions qui les emploient, de concert avec les écoles de santé publique, les écoles d'ingénieurs et les centres d'énergie atomique.

Le personnel d'hygiène industrielle (médecins, ingénieurs, infirmières)

Comme il y a lieu de s'attendre à un emploi de plus en plus étendu de l'énergie nucléaire dans l'industrie, il est indispensable que le personnel d'hygiène industrielle soit en mesure de s'acquitter des nouvelles fonctions qui lui incomberont de ce fait. Les écoles de santé publique devraient ajouter à leur programme d'études un enseignement général sur la nature de la radioactivité, sa détection et sa mesure dans l'atmosphère et dans les tissus animaux (de même que dans les excreta), sur les méthodes de protection du personnel et de prévention des risques d'irradiation dans l'industrie et sur l'élimination des déchets industriels radioactifs. Comme dans le cas d'autres catégories de techniciens sanitaires, des cours d'entretien ou de perfectionnement devraient être organisés par les écoles de santé publique pour le personnel déjà en fonction, de concert avec les firmes industrielles et les institutions gouvernementales.

TECHNOLOGIE : LES BIOPHYSICIENS

L'emploi étendu de l'énergie nucléaire a fait apparaître la nécessité d'un corps de techniciens sanitaires capables de manier, d'interpréter et de maîtriser cette force à la fois utile et susceptible d'avoir des effets nocifs. En un certain sens, cette profession relativement nouvelle est comparable à celle de bactériologiste ou de biochimiste dans des domaines différents. Il est évident que les trois catégories mentionnées ci-après constituent une classification provisoire et pourront ultérieurement se subdiviser suivant les circonstances.

Le technicien ou détecteur de rayonnements

Dans presque tous les domaines mentionnés ici, le besoin se fait sentir d'un technicien compétent pour les travaux courants. Les fonctions du détecteur de rayonnements consistent à déceler et à mesurer la radioactivité brute, à apprécier les risques d'irradiation et à manipuler les isotopes radioactifs. Il exécute les travaux courants de cet ordre dans les hôpitaux, les établissements industriels, les laboratoires et les services de santé publique, et utilise surtout des connaissances empiriques. Du point de vue des effectifs, c'est probablement la catégorie la plus nombreuse qu'il y ait lieu de former.

Cette formation n'a pas besoin d'être étendue et certains pensent qu'elle pourrait commencer en cours même de fonctions dans les institutions où l'on utilise des substances radioactives. Cependant, d'autres auteurs ont préconisé un enseignement formel dans des écoles techniques et autres établissements d'enseignement. Parmi ces derniers, on peut classer les écoles de médecine qui désirent étendre leur champ d'activité.

Le contrôleur (biophysicien)

Ce type de technicien a pour responsabilité d'assurer la protection contre les radiations dans les cas qui dépassent le simple contrôle courant. Ses études doivent être équivalentes à des études de licence. Elles porteront principalement sur la physique, la chimie ou la technologie, la dernière année étant consacrée à la physique atomique et nucléaire, à la biologie spécialisée dans ses rapports avec les questions nucléaires, à des cours d'électronique, etc. Ce personnel doit connaître à fond les dangers des radiations ionisantes, les principes de leur mesure, l'instrumentation, les méthodes de protection, le contrôle du personnel exposé aux radiations, les méthodes de détection de la radioactivité ambiante, le contrôle des bâtiments, les procédés de décontamination, etc. Il est suggéré que ce personnel, au terme des études universitaires normales, fasse un stage surveillé d'au moins trois mois dans des centres agréés.

Le spécialiste (biophysicien de grade supérieur)

Cette catégorie comprend les personnes qui ont à s'occuper des grands problèmes que posent les programmes d'utilisation des radiations. Le spécialiste exerce notamment des fonctions de consultant pour l'établissement des plans des installations. En plus d'études théoriques et pratiques équivalant à un doctorat, le spécialiste devrait pouvoir faire état de connaissances en psychologie et de l'expérience des questions administratives. Cette formation, qui doit revêtir à la fois la forme de cours universitaire et de cours de perfectionnement après l'entrée en fonctions, est une entreprise de longue haleine pour laquelle on ne saurait fixer un nombre précis d'années.

RECHERCHES

Dans un domaine nouveau qui se développe constamment comme c'est le cas ici, il est essentiel de prévoir des recherches à la fois fondamentales et

appliquées. La nature hautement individualisée de ce travail ne permet pas de classer le personnel en catégories.

Le médecin ou tout autre technicien sanitaire qui se destine à la recherche en médecine nucléaire a besoin de recevoir une formation très poussée, généralement en commun avec d'autres experts ou chercheurs. Aucun cours, au sens propre du mot, n'est envisagé pour cette catégorie au stade actuel, bien que la personne admise comme chercheur doit avoir fait preuve de sa compétence dans le domaine considéré. Dans certains cas, des radiologistes expérimentés qui utilisent du matériel à voltage élevé vont suivre, à titre individuel, une formation en médecine nucléaire auprès de collègues. Des arrangements de ce genre peuvent être pris dans les hôpitaux et les laboratoires rattachés à des écoles de médecine ou à d'autres institutions qui utilisent les substances radioactives.

Il convient peut-être de mentionner que le chercheur, en plus d'une formation dans le domaine particulier qui l'intéresse, doit posséder une connaissance générale des problèmes de contamination, de risques, d'élimination des déchets, etc., tels qu'ils se posent notamment dans le laboratoire où il travaille.

PROGRAMME DE L'OMS EN MATIÈRE D'ENSEIGNEMENT ET DE FORMATION PROFESSIONNELLE

L'Organisation mondiale de la santé, institution spécialisée des Nations Unies, est composée de plus de quatre-vingts États membres. Sa constitution lui impose entre autres fonctions de « favoriser l'amélioration des normes de l'enseignement et de celles de la formation du personnel sanitaire médical et apparenté » et de « fournir toutes informations, donner tous conseils et toute assistance dans le domaine de la santé ». En adoptant sa constitution, les États membres ont notamment souscrit au principe suivant : « L'admission de tous les peuples au bénéfice des connaissances acquises par les sciences médicales, psychologiques et apparentées est essentielle pour atteindre le plus haut degré de santé ».

Pour atteindre ces objectifs généraux, l'OMS s'efforce en particulier d'aider à la formation d'un plus grand nombre de techniciens de la santé et d'accroître leurs compétences. Elle a entrepris un programme qui comporte l'application de plusieurs méthodes et qui s'adresse à certaines catégories de personnel sanitaire. Les méthodes en question sont brièvement exposées ci-après et l'on indiquera, à propos de chacune d'elles, comment, dans les limites du possible, elles sont applicables au domaine de l'énergie nucléaire.

Projets de démonstrations

Ces projets, entrepris dans les pays qui ont à faire face à certains problèmes sanitaires particuliers, ont pour but : *a*) d'organiser certains services sanitaires destinés à répondre aux besoins de la population, et *b*) de former un noyau de personnel qui sera ensuite capable d'assurer la continuation de l'œuvre entreprise dans le pays ou la région considérée. Ce deuxième point implique un travail d'enseignement et de formation professionnelle qui représente l'un des moyens par lesquels l'OMS aide les pays à résoudre leurs problèmes sanitaires. Lorsque l'utilisation de l'énergie nucléaire se sera développée au point où elle suscitera des problèmes sanitaires dans les pays, il est probable que l'OMS sera priée de fournir des experts pour procéder à des démonstrations et pour former du personnel. Ce programme exigera toute une coordination avec d'autres institutions.

Assistance aux établissements d'enseignement

Ce programme a pour but de créer et de renforcer dans les pays les moyens nécessaires à l'enseignement et la formation de personnel. L'OMS a prêté son aide à des écoles de médecine, des écoles de santé publique, des institutions qui forment du personnel auxiliaire, des instituts de recherche, etc., en leur procurant des professeurs, en leur envoyant du matériel et des fournitures et en leur donnant des avis autorisés sur les questions d'enseignement. Un des buts importants que s'est proposé ce type de programme est la formation de professeurs qui continueront l'œuvre entreprise dans leur pays. L'inclusion de l'enseignement de la médecine nucléaire dans le programme d'études du corps médical et du personnel de santé publique entraînera peut-être un grand nombre d'institutions à prier l'OMS de les aider en leur envoyant des experts. Cependant, si le sujet à enseigner relève de la biochimie, de la physiologie, de l'anatomo-pathologie, etc., la solution consistera peut-être à en confier l'enseignement à des biochimistes, des physiologistes, des anatomo-pathologistes, etc., très au courant de l'application de la médecine nucléaire à leur spécialité (dans la mesure où ce personnel existe en nombre suffisant), plutôt qu'à des experts de la médecine nucléaire en elle-même. Cette remarque implique bien entendu que le pays ou l'institution en cause est à même d'adopter ce système.

Bourses d'études

L'OMS accorde des bourses d'études à des particuliers, sur la recommandation et la demande de leur gouvernement, pour leur permettre de recevoir une formation qu'ils ne pourraient acquérir dans leur pays d'origine et sans laquelle telle ou telle activité donnée ne saurait être menée à bien. Ces bourses sont fréquemment rattachées à des projets de démonstrations de l'OMS ou à un projet d'assistance à des établissements d'enseignement. Les bénéficiaires sont ainsi en mesure de suivre certains cours organisés ou de faire des stages dans divers services. Le programme d'études du boursier est établi de concert par le gouvernement requérant,

le candidat, le pays d'accueil et l'OMS. Les travaux sur la médecine nucléaire n'étant entrepris que dans un nombre relativement peu élevé de pays, les bourses d'études constitueront peut-être un important moyen de diffusion des connaissances. Depuis 1949, l'OMS a octroyé six bourses pour l'étude des radioisotopes [Autriche, Égypte (deux), Italie, Grèce, Philippines], représentant au total cinquante et un mois. Trois des bénéficiaires ont fait leurs études dans le Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord et trois autres aux États-Unis d'Amérique. Les boursiers comprenaient trois radiologistes, un pharmacologiste, un biochimiste et un assistant de clinique. Quatre s'intéressaient surtout à des travaux cliniques, un cinquième à des recherches en physiologie et le sixième à des recherches en matière de nutrition. Il n'est pas surprenant que les demandes de bourses pour l'étude de la médecine nucléaire aient été peu nombreuses, étant donné l'immensité des besoins qui se manifestent actuellement dans les autres domaines médico-sanitaires.

Échange d'informations scientifiques

L'activité de l'OMS à cet égard s'est traduite par la réunion de séminaires, de conférences et de groupes d'études, par l'envoi de missions d'enseignement médical et par l'organisation d'échanges internationaux de professeurs et de chercheurs. L'objet de ces initiatives est de donner aux techniciens de la santé l'occasion de « rafraîchir » leurs connaissances plutôt que d'acquérir une formation de base ou même de se perfectionner dans une branche déterminée. Les échanges de personnel se font à l'intérieur d'une même discipline; les réunions de courte durée sont, en général, consacrées à des questions particulières qui peuvent intéresser plusieurs disciplines; quant aux missions d'enseignement médical, elles se rapportent à des sujets très divers. Pour favoriser la diffusion des connaissances en médecine nucléaire, la réunion de conférences, de séminaires, etc., de courte durée semble être particulièrement utile, car le sujet met en jeu plusieurs disciplines; il faut cependant éviter une trop grande dispersion. L'OMS devrait être prête à organiser directement ou indirectement des réunions internationales de ce genre pour l'étude de certaines questions, compte tenu, naturellement, des besoins et des ressources des pays intéressés.

Comités d'experts

Des comités d'experts sont réunis de temps à autre sur divers sujets concernant la santé et, par la publication de leurs rapports, l'OMS contribue au progrès et à la mise au point des connaissances dans un domaine particulier. Cette entreprise d'ordre éducatif a une portée mondiale et intéresse toutes les professions sanitaires. L'Assemblée mondiale de la santé a approuvé en principe la réunion en 1956 d'un ou deux comités d'experts pour discuter de certaines questions particulières concernant l'énergie nucléaire dans ses rapports avec la médecine.

Publications

Les publications telles que monographies et périodiques techniques constituent un autre effort éducatif de portée mondiale, bien que les articles et études soient en général présentés comme exprimant les opinions de leur auteur plutôt que celles d'un comité. Cependant, du point de vue de la diffusion des connaissances, ces publications se rapprochent des rapports de comités d'experts. D'une manière générale, les communications scientifiques sur l'énergie nucléaire appliquée à la médecine et à la santé publique rentreraient bien dans le cadre des publications de l'OMS.

CONCLUSIONS

La découverte de nouvelles forces donne lieu d'espérer qu'elles pourront être mises au service de l'humanité, notamment dans les domaines de la médecine et de la santé. Comme ce fut le cas pour tant d'autres progrès technologiques accomplis au XX^e^ siècle, les bienfaits escomptés ne pourront être obtenus sans le concours de techniciens à la fois pleinement compétents et suffisamment nombreux. Ceci est tout particulièrement vrai dans le cas de l'énergie atomique où les dangers d'un emploi inconsidéré risquent de l'emporter sur les avantages.

L'OMS est l'institution intergouvernementale compétente pour les questions de santé. En cette qualité, elle a commencé à examiner sous quelle forme elle pourrait aider les gouvernements, les institutions et les particuliers à former des techniciens sanitaires spécialisés dans l'énergie nucléaire. Les méthodes déjà employées par l'OMS peuvent être aisément adaptées à l'enseignement de la médecine nucléaire, mais il ne s'ensuit pas qu'il faille écarter, de ce fait, la mise au point de nouvelles méthodes.

L'OMS est désireuse de contribuer à développer l'enseignement et la formation en matière de médecine nucléaire, mais elle doit rappeler que, dans chaque pays, le progrès technique est lié aux caractéristiques sociales et économiques. Les notions complexes qui entrent en jeu dans les questions d'énergie atomique exigent que le pays considéré ait atteint un certain stade de développement technique, aussi bien que de développement social et économique, pour pouvoir tirer parti de cette nouvelle branche de la science dans le domaine de la vie courante. L'OMS met tout en œuvre pour faciliter l'obtention rapide de ces résultats.

ANNEXE

L'OMS a réuni des renseignements sur les initiatives prises en matière d'enseignement et de formation professionnelle dans plusieurs pays. Ces initiatives sont brièvement indiquées ci-après à simple titre d'exemples. Bien que la liste soit fragmentaire et incomplète et ne corresponde pas à la classification adoptée dans l'exposé qui précède, elle pourrait constituer la base d'une étude plus poussée si la question éveillait un intérêt suffisant dans le monde. En prévision des multiples demandes qui pourront lui être adressées, l'OMS serait heureuse d'être informée des cours institués et de toutes autres dispositions nouvelles prises dans ce domaine.

Canada

Au Canada, l'emploi des radioisotopes chez l'homme est surveillé par un comité clinique consultatif composé de médecins ayant l'expérience de l'application de ces substances. Ce comité s'efforce de donner aux médecins désireux d'utiliser des radioisotopes à des fins cliniques la possibilité d'acquérir une formation et une expérience suffisantes. Un certain nombre d'hôpitaux, dans les centres les plus importants, sont en mesure d'offrir à des médecins des stages de trois mois ou de plus longue durée. Ces stages portent sur l'application effective des radioisotopes aux malades, sur les techniques de comptage et sur les travaux du même ordre.

Quant à la formation en matière d'emploi des radioisotopes dans la recherche biologique, elle peut être obtenue auprès de plusieurs universités, en général dans les départements de biologie. L'établissement de l'Atomic Energy of Canada Limited, à Chalk River, dispense un enseignement analogue sur une échelle réduite.

L'enseignement de la « physique radiologique » (étude de la mesure des doses en thérapeutique radiologique dans les hôpitaux) peut être acquis au moyen de cours complémentaires de niveau universitaire. Ces cours ont un caractère largement pratique et comportent l'emploi de mannequins et d'appareils à rayons X et la manipulation de radioisotopes dans des laboratoires spécialisés d'hôpitaux.

Pour ce qui est de la protection radiologique, il est admis qu'il faut mettre au point des programmes appropriés de formation. Parmi les institutions qu'intéresse l'emploi des radioisotopes figurent les hôpitaux, les universités et les autres institutions de recherche, sans compter de multiples établissements industriels. Jusqu'à une date récente, l'établissement de l'Atomic Energy of Canada Limited, à Chalk River, a été le seul qui ait dispensé une formation systématique en la matière, mais le Département national de la santé a maintenant pris des mesures pour créer des cours de base. Au début de cette année, des cours ont été donnés à des ingénieurs sanitaires de ce département que peuvent intéresser des problèmes tels que l'élimination des déchets, la contamination accidentelle par des substances radioactives et l'exposition des travailleurs industriels aux radiations. Il y a lieu d'espérer que ces cours seront développés à l'avenir, du double point de vue de leur portée et de leur fréquence, afin qu'un plus grand nombre de membres du personnel sanitaire et autre puissent en profiter. Indépendamment des cours systématiques dont le Département de la santé envisage la création, la manipulation des radioisotopes est enseignée dans de nombreux laboratoires spécialisés du Canada. Des laboratoires de ce genre existent dans d'autres services gouvernementaux, dans plusieurs universités et dans des centres de recherche. En fait, un nombre toujours croissant de diplômés des universités peuvent ainsi acquérir, sous la direction de personnes expérimentées, une formation tout à fait satisfaisante dans la manipulation des substances radioactives.

États-Unis d'Amérique

L'Institut de médecine nucléaire de la Fondation Lovelace, à Albuquerque, va se consacrer à des recherches fondamentales et à des études pratiques d'ordre médical portant sur les radioisotopes et les radiations nucléaires ainsi que sur la mise au point de matériel ou d'équipement électronique et nucléaire. Une bibliothèque spéciale de référence réunira la littérature publiée dans l'ensemble du monde sur la médecine nucléaire et l'on envisage de faire paraître un journal de médecine nucléaire (informations extraites du *Journal of American Medical Association*, 29 janvier 1955).

Cinq cours consacrés à la radiologie dans ses rapports avec la santé ont été prévus au Centre de génie sanitaire Robert A. Taft, du Service de santé publique, en 1954-1955. Ils sont destinés avant tout au personnel technique des Départements de la santé des États et des collectivités locales. Leur but est d'enseigner à ce personnel l'importance des radiations ionisantes, les risques généraux et les risques professionnels que l'emploi de ces substances comporte et les moyens que l'on recommande en vue de réduire ces dangers.

A Oak Ridge (Tennessee), la première classe composée entièrement de spécialistes (trente et un) appartenant à vingt et un pays autres que les États-Unis d'Amérique on commencé d'étudier la manipulation des radioisotopes. Les cours, d'une durée de quatre semaines, sont donnés à l'Institut d'études nucléaires d'Oak Ridge environ six fois par an. Les sujets traités sont les suivants : instrumentation, préparation des substances radioactives, physique médicale, effets biologiques, dosimétrie, etc. Des diplômés américains et étrangers de l'Institut d'Oak Ridge mettent déjà en pratique les connaissances qu'ils ont acquises dans cet établissement en les appliquant à de très nombreux sujets allant de la thérapie du cancer à des expériences de conservation des denrées périssables.

L'École de science et de technologie nucléaires, qui constituait l'un des principaux projets prévus dans le programme « L'atome au service de la paix », s'est ouverte en mars 1955, au Laboratoire national d'Argonne. Indépendamment de trente et un étudiants étrangers appartenant à dix-neuf pays, la première classe comprend neuf représentants de l'industrie américaine. Le programme d'études, d'une durée de sept mois, comporte des cours divers sur la conception, la construction et le fonctionne-

ment des piles destinées à la recherche nucléaire, sur les principes de construction des piles destinées à la production d'énergie nucléaire, sur la manipulation des substances irradiées et sur d'autres sujets apparentés. Cette entreprise, qui relève de la Commission de l'énergie atomique, est organisée en collaboration avec la Foreign Operations Administration et le Département d'État. Les pays qui sont représentés parmi les étudiants de la première promotion sont les suivants : République Argentine, Australie, Belgique, Brésil, Égypte, Espagne, France, Grèce, Guatemala, Indonésie, Israël, Japon, Mexique, Pakistan, Philippines, Portugal, Suède, Suisse et Thaïlande.

L'enseignement de la physique médicale (protection contre les radiations) est dispensé dans trois centres : l'Université Vanderbilt, l'Université de Rochester et l'Université de l'État de Washington (Seattle), les travaux pratiques étant effectués respectivement à Oak Ridge, au Laboratoire national de Brookhaven et au Hanford Works. Le cours de Rochester-Brookhaven porte tout particulièrement sur les questions biologiques, tandis que les deux autres sont plutôt consacrés aux questions de physique. Les conditions imposées à l'entrée sont du même ordre pour ces trois cours : possession du diplôme de « bachelor » en sciences ou en technologie. Chaque cours réunit vingt-cinq étudiants (soit un total de soixante-quinze) choisis par un comité de sélection composé d'un représentant de chaque université et de chaque laboratoire. Le cours dure une année universitaire. Les sujets traités sont, dans l'ensemble, les suivants : physique nucléaire, biologie des radiations, appareillage utilisé pour les radiations, hygiène industrielle, toxicologie, etc. Les cours sont suivis d'un stage pratique de dix semaines.

A l'École de médecine et de dentisterie de l'Université de Rochester, le Département de biologie des radiations dirige le Centre d'énergie atomique de l'Université de Rochester par contrat avec la Commission de l'énergie atomique. Ce centre délivre des diplômes dans trois domaines différents : biophysique, pharmacologie-toxicologie et biologie des radiations. Le nombre des étudiants diplômés qui s'inscrivent à ce cours varie entre soixante et quatre-vingt et se répartit assez également entre les trois sections. En outre, le centre donne un cours de médecine industrielle aux diplômés d'écoles de médecine agréées, qui, après l'obtention de leur diplôme, ont poursuivi des études complémentaires pendant deux ans. Antérieurement, ce cours durait une année universitaire et était suivi d'un stage d'une année dans une usine. A l'avenir, il comportera une deuxième année avant le stage, le Board of Occupational Medecine nouvellement créé imposant désormais deux ans d'études pour la délivrance du diplôme. En général, deux ou trois étudiants bénéficient chaque année d'une bourse de la Commission de l'énergie atomique pour l'étude de la médecine industrielle.

France

L'Université de Paris organise un cours de physique biologique et médicale, à raison de trois après-midi par semaine pendant une période de six mois, au Centre d'études nucléaires de Saclay. Ce cours est ouvert aux biologistes, aux pharmaciens, aux médecins ou aux étudiants avancés dans l'un des domaines considérés. On y enseigne l'emploi et les méthodes de manipulation des radioisotopes. Les étudiants ayant suivi avec succès ce cours préliminaire reçoivent un certificat qui leur permet d'entreprendre des études supérieures pendant une deuxième année dans le Service de biologie du Commissariat à l'énergie atomique. Cette deuxième année consiste en un cours à plein temps pendant lequel l'étudiant utilise des substances atomiques et procède à certaines recherches. Un diplôme d'études supérieures est conféré aux candidats après présentation d'un mémoire qui peut être également soumis comme thèse de médecine ou de pharmacie. Chaque année, un ou deux nouveaux diplômés sont employés par le commissariat.

Un cours de six semaines est donné conjointement par le Centre national de la recherche scientifique, le Commissariat à l'énergie atomique et l'Institut national d'hygiène. Il s'adresse aux personnes qui utilisent des substances radioactives, chercheurs, biologistes, médecins, chimistes, ingénieurs, etc., dûment qualifiés. Les étudiants sont groupés en deux sections : 1) chimie, chimie-physique, applications industrielles; 2) biologie et médecine. Un enseignement théorique et pratique est donné sur la manière de manipuler et de transporter les substances atomiques et sur les risques qui en résultent. Le cours ne donne pas lieu à délivrance de diplôme. Il est intéressant de noter qu'en plus des étudiants français quarante-trois étudiants appartenant à vingt-deux pays étrangers avaient déjà suivi ce cours au début de 1955.

Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord

L'École des isotopes de Harwell, qui, depuis qu'elle a été créée en 1951, a accueilli trois cent vint-neuf étudiants venus de vingt-neuf pays différents, établit actuellement son programme pour l'année prochaine. L'École donne un enseignement sur les applications des substances radioactives dans la recherche et dans l'industrie et sur les techniques de production, de mesure et de manipulation de ces substances. Les pays qui, en dehors du Royaume-Uni, ont envoyé des étudiants auprès de l'École sont : l'Australie, l'Union Sud-Africaine, l'Allemagne, la République Argentine, l'Autriche, la Belgique, le Brésil, le Chili, le Danemark, l'Égypte, l'Espagne, les États-Unis d'Amérique, la Finlande, la France, la Grèce, les Pays-Bas, l'Inde, l'Irlande, Israël, l'Italie, le Liban, la Norvège, le Pakistan, le Portugal, la Suède, la Suisse, la Turquie et la Yougoslavie. Les cours, qui durent quatre semaines, comportent à la fois des conférences et des travaux pratiques en laboratoire. Les étudiants doivent être diplômés d'une université.

L'Université de Birmingham ouvrira l'automne prochain un cours post-universitaire d'un an pour l'enseignement des emplois industriels des isotopes. Les candidats qui auront suivi ce cours seront aptes à entrer dans des hôpitaux, dans des établissements industriels et dans des centres d'énergie atomique, et seront à même de jouer le rôle de conseillers industriels.

Le British Council, de concert avec l'Atomic Energy Research Establishment, a prévu un cours

sur l'emploi des radioisotopes par les ingénieurs, qui aura lieu à Harwell et à Londres du 12 au 25 juin 1955.

A l'Université de Glasgow, le Département de physique donne un enseignement en matière nucléaire à presque tous les étudiants des facultés de sciences, de médecine et de technologie, et a organisé pour les étudiants qui désirent se spécialiser (honours students) des cours supérieurs sur les recherches actuelles.

Des cours de deux ans pour l'obtention de diplômes de radiologie tels que le diplôme de radiodiagnostic médical (DMRD) et le diplôme de radiothérapie médicale (DMRT) sont organisés pour les diplômés en médecine. Ces cours sont donnés dans les principaux centres de radiothérapie et de radiodiagnostic, tels que le Royal Cancer Hospital.

Il existe, en outre, des cours de deux ans institués avec la collaboration de la Société des radiologistes de Londres pour les radiologistes entrés en fonction dans des services de radiologie médicale. Ces cours donnent lieu à un examen en deux parties et les candidats reçus ont le droit de faire suivre leur nom des lettres MSR (membre de la Société des radiologistes).

Le City and Guilds of London Institute ouvrira en septembre 1955 un cours à temps partiel de deux ans pour des étudiants désireux de s'initier à la radiologie industrielle. Un examen aura lieu à la fin du cours et les candidats reçus se verront délivrer par l'Institut un certificat en radiologie industrielle. Le cours portera sur les sujets suivants : physique des radiations, rayon X et radioactivité, normes fondamentales de protection, dose maximum admissible, effets biologiques des rayonnements ionisants, protection ambiante, contrôle de la radioactivité, emploi d'écrans mobiles de protection contre les radiations diffusées, détection des rayonnements, etc.

Compte rendu de la séance 24.2

Samedi 20 août 1955 (après-midi)

Président : M. H. J. Bhabha (Inde)
Secrétaires scientifiques : MM. J. Gaunt, I. Ulehla et A. Salam

PROGRAMME

P/983 Formation du personnel de recherches dans le domaine des applications pacifiques de l'énergie atomique . . . UNESCO

Discussion

M. Auger (UNESCO) présente comme suit le mémoire P/983 : L'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture a préparé un document relatif aux problèmes de la formation du personnel scientifique, des chercheurs, des ingénieurs, nécessaires au développement des applications pacifiques de l'énergie atomique. Je ne vous lirai pas ce mémoire, mais je me contenterai plutôt de commenter brièvement quelques-uns des points qui y sont mentionnés et peut-être d'étendre quelque peu cet exposé au problème général du recrutement scientifique et technique.

Il est clair que le problème actuel, le problème immédiat, est celui que posent l'apparition et le développement d'une branche nouvelle de la science et de la technique. Ce problème ne se pose pas pour la première fois. Au cours du développement de l'ère scientifique et de la révolution industrielle, il est arrivé maintes fois que des sujets scientifiques importants et des techniques nouvelles se développaient rapidement et que le système d'éducation devait faire face à ces développements en produisant le plus rapidement possible les chercheurs, les ingénieurs et les techniciens indispensables. Successivement, la mécanique puis la thermodynamique, l'électricité, la chimie enfin, sont venues demander aux systèmes d'éducation le personnel qui leur était nécessaire. Les systèmes d'éducation, il ne faut pas se le cacher, ne sont pas très bien adaptés à des changements de cette nature. Les professeurs, surtout dans les écoles secondaires et primaires, ont une tendance bien naturelle à enseigner ce qu'ils ont eux-mêmes appris lorsqu'ils étaient à l'école ou dans les établissements spéciaux destinés à la formation des professeurs, et il est assez difficile de rompre ce cercle qui se ferme sur lui-même pour y introduire des nouveautés très importantes. Il faut cependant le faire.

Lorsque des événements de ce genre se sont produits, en règle générale, on crée en premier lieu des écoles spéciales, des écoles d'un niveau élevé, des écoles qui s'adressent aux étudiants sortant déjà de l'Université. Je prends un exemple en France : la création de l'École supérieure d'électricité qui a été fondée au moment où il est devenu clair que l'industrie et la recherche feraient appel dans une mesure importante à cette branche.

Mais ceci n'est nullement suffisant. En effet, il ne suffit pas de créer des écoles spéciales dans les domaines nouveaux qui viennent de s'ouvrir, il faut aussi que le système d'ensemble de l'éducation s'adapte aux nouvelles idées, ce qui est beaucoup plus difficile. Pour cela, il faut évidemment faire appel aux gouvernements qui sont responsables, d'une manière générale, de l'enseignement dans les différents pays et leur rappeler ce que disait un grand homme d'État : « Gouverner c'est prévoir ». Les pouvoirs publics, pour gouverner, doivent donc prévoir et prévoir longtemps à l'avance. Or, à l'heure actuelle, il est clair que les systèmes d'éducation forment des jeunes gens qui sont peut-être adaptés au monde d'il y a quelques années, mais ne le sont déjà plus au monde actuel et ne le sont en tout cas absolument plus au monde qu'ils trouveront lorsqu'ils sortiront des universités et des écoles pour entrer à leur tour dans la carrière.

Parmi les problèmes qui se posent, celui de la spécialisation est particulièrement important dans le domaine qui nous occupe. A quel moment faut-il commencer à donner aux jeunes gens une éducation spéciale dans le domaine par exemple des applications de l'énergie atomique, de la physique nucléaire ou de la chimie nucléaire ? Bien entendu, il ne faut pas commencer trop tôt, comme on le fait trop souvent pour les spécialisations. Il faut éviter que les jeunes gens, mettons de quinze ans, ayant décidé,

après avoir visité les admirables expositions que l'on peut voir ici au Palais des Nations, qu'ils voulaient faire carrière dans l'énergie atomique, ne veulent plus entendre parler de rien d'autre que ce qui concerne l'atome et, par exemple, suivent sans intérêt les études de mathématiques ou de chimie auxquelles on les convie, parce qu'on n'y parle pas tout le temps d'atomes.

Il est donc très important que l'on maintienne pendant une durée suffisante une éducation scientifique générale. C'est seulement à la sortie de l'Université que la véritable spécialisation doit prendre place.

Il convient, par conséquent, de réformer les enseignements classiques — chimie, physique, biologie notamment — que l'on donne à l'Université, de les moderniser en introduisant le plus tôt possible — peut-être même au stade secondaire — les études de radioactivité, de chimie-physique, de thermodynamique et même de radiobiologie, dont ces personnels auront besoin dans leurs carrières ultérieures.

La formation spéciale qui leur sera nécessaire pour devenir de bons chercheurs et de bons ingénieurs dans le domaine de l'application de l'énergie atomique leur sera dispensée ensuite au cours d'une, de deux ou de trois années d'études complémentaires qu'ils pourront suivre dans des établissements spéciaux, hors des universités généralement, établissements qui doivent présentement rester attachés de très près aux organisations appliquant l'énergie atomique. Ce n'est, en effet, que dans ces établissements spéciaux que l'on peut trouver actuellement les piles, les cyclotrons ou les grands instruments qui sont nécessaires pour familiariser l'ingénieur, le technicien avec les équipements dont ils auront besoin ultérieurement. Nous venons d'entendre les représentants de plusieurs pays annoncer qu'ils ouvraient de tels cours, non seulement pour leurs nationaux, mais pour les étudiants des autres pays.

Dans une de ses célèbres *Adresses*, John Stuart Mill a dit que les hommes étaient avant tout des hommes et que pour faire de bons avocats ou de bons médecins, il fallait commencer par former des hommes raisonnables et capables, qui deviendraient facilement plus tard de bons avocats ou de bons médecins. Dans le cas qui nous intéresse, il s'agit de faire de bons scientifiques. Lorsque nous verrons sortir de l'Université des étudiants dotés d'une solide culture scientifique, il sera aisé de faire de bons physiciens nucléaires ou de bons ingénieurs chimistes nucléaires.

En même temps que l'introduction, dans les études secondaires et supérieures, des quelques spécialités indispensables que je viens de citer, il faut aussi veiller à étendre l'intérêt des étudiants de façon qu'ils ne se limitent pas trop étroitement à un sujet. Tout d'abord, il leur est difficile de choisir une carrière qui leur convienne s'ils n'ont eu connaissance que de problèmes très limités; il est indispensable qu'au cours de leurs études ils touchent, même superficiellement, aux sciences voisines : d'une part ils peuvent avoir besoin de ces éléments dans le cours de leur carrière, d'autre part ils élargissent ainsi leur état d'esprit scientifique.

A cet égard, j'insisterai particulièrement sur le cas de la biologie. Il me paraît inadmissible que des ingénieurs ou des chercheurs, qu'il s'agisse de physiciens ou de physiciens théoriciens appelés à appliquer sur le plan technique les découvertes nucléaires, n'aient pas une connaissance profonde de la biologie, en particulier de l'action biochimique des radiations. Il ne suffit pas de lire les règlements pour se convaincre du danger que présente le fonctionnement de telle ou telle machine. Si ceux qui seront chargés d'élaborer les plans d'équipement, de calculer les éléments des machines, n'ont pas constamment à la mémoire les dangers que peuvent courir ceux qui devront faire fonctionner ces appareillages, qu'il s'agisse des ouvriers ou des chercheurs, des catastrophes pourront s'ensuivre.

J'ai cité tout à l'heure John Stuart Mill et nous avons reconnu que pour faire de bons ouvriers scientifiques de l'énergie atomique, il fallait tout d'abord de bons scientifiques. On pourrait croire que dans le monde actuel, avec le rapide et admirable développement des sciences, les jeunes gens se pressent dans les classes scientifiques et qu'il n'y a aucune difficulté à en recruter le nombre nécessaire. Si nous regardons les faits tels qu'ils sont en réalité, nous voyons que dans bien des cas, c'est le contraire qui se produit : paradoxalement, dans de nombreux pays, le nombre d'étudiants qui s'inscrit dans les classes scientifiques non seulement n'est pas en croissance, mais il est en décroissance à l'heure actuelle. Il y a quelques notables exceptions dans le monde, mais en général on peut dire que le nombre d'étudiants se consacrant aux sciences, se destinant aux carrières scientifiques, est très insuffisant et ne répondra pas, dans quelques années, aux besoins.

Je ne crois pas m'éloigner de mon sujet actuel qui est celui des cadres scientifiques nécessaires pour le développement de l'énergie atomique en jetant un cri d'alarme en ce qui concerne le fonctionnement de tout le recrutement de tout le cadre scientifique général. Il faut arriver à augmenter ce recrutement scientifique qui est en train de décroître. Il faut peut-être analyser les causes possibles de cette décroissance, de cette désaffection pour l'éducation et les carrières scientifiques. Il y a, naturellement, à considérer les élèves, les professeurs et les familles — les parents d'élèves.

En ce qui concerne les élèves, certains d'entre eux sont certainement rebutés par la difficulté des classes scientifiques, par les mathématiques, par la chimie. D'autre part, ces jeunes gens, dans les milieux qu'ils fréquentent, ont certainement remarqué, car ils sont observateurs, qu'autour d'eux il est assez élégant et même de bon ton de déclarer

que l'on ignore tout des mathématiques ou de la physique ou de l'astronomie. Il est, par contre, tout à fait catastrophique de se trouver, par maladresse, dans la position d'avouer que l'on ignore, disons, le sujet de telle ou telle pièce de Shakespeare. Les étudiants ont remarqué ce fait et ils savent, par conséquent, que pour être un gentleman il faut avoir fait des études littéraires. Mais ils savent, par contre, que n'avoir fait aucune étude scientifique et être absent du mouvement scientifique actuel ne présente pas de danger réel pour leur condition dans le monde.

Il y a là, à mon avis, un grand effort de propagande à faire auprès des jeunes gens eux-mêmes, afin de leur montrer que l'on peut parfaitement avoir une éducation littéraire suffisante et raisonnable, tout en ne négligeant pas totalement la formation scientifique, et que du moins, elle n'est pas contraire à une formation littéraire. C'est aussi auprès des professeurs qu'il faudrait faire une campagne de ce genre; en effet, les professeurs littéraires, très attachés à leurs traditions, ont une tendance, naturelle d'ailleurs, à orienter les meilleurs élèves vers les carrières littéraires et à les écarter systématiquement des carrières scientifiques. On peut remarquer, dans beaucoup d'établissements scolaires, que les meilleures classes, celles où se trouvent les jeunes gens les plus intelligents et les plus capables, sont les classes littéraires et que, dans les classes scientifiques, ce ne sont par les meilleurs éléments que l'on trouve.

Il conviendrait également de faire un effort auprès des parents d'élèves. Il est bien naturel que, s'ils n'ont pas eux-mêmes de contact avec la science, ils ne sachent pas diriger leurs enfants vers les carrières scientifiques; ils ont une tendance naturelle, sinon à les en écarter, du moins à ne pas les y pousser.

Il y a là, certainement, un important travail à faire pour les pouvoirs publics, les fondations publiques et privées et les organisations internationales; je voudrais citer tout particulièrement, parmi ces dernières, l'UNESCO, puisqu'elle est l'institution spécialisée des Nations Unies pour l'éducation et la science.

Quelles sont les méthodes que l'on peut mettre en œuvre pour augmenter le recrutement dans les classes scientifiques et, par conséquent, préparer l'avenir, l'avenir en particulier du développement de l'énergie atomique ?

On peut donner des bourses systématiquement aux scientifiques; on peut faciliter les études scientifiques en offrant des prêts-salaires ou des carrières faciles pour les débuts dans la recherche scientifique. On peut améliorer le recrutement des professeurs de sciences, qui, dans certains cas, n'est pas aussi bon qu'on pourrait le souhaiter; on peut leur faciliter le maintien du contact avec les sciences vivantes, leur permettre d'intéresser leurs élèves en se tenant eux-mêmes au courant de ce qui se fait dans le mouvement scientifique.

Enfin, et ce n'est pas là le moindre effort qu'il nous faut faire, il importe également de faire l'éducation des adultes. Il faut que ceux qui sont sortis des universités sans avoir eu l'éducation scientifique nécessaire puissent au moins se rapprocher du mouvement scientifique et ne pas en être complètement absents. On mettra à leur disposition des expositions, des livres faciles à lire, des émissions de radio et de télévision. Il y a là de grandes possibilités pous associer le public en général au mouvement scientifique, pour compléter les connaissances scientifiques de chacun, pour que tous participent directement à la grande aventure scientifique dans laquelle l'humanité est maintenant engagée sans retour.

DISCUSSION DU MÉMOIRE P/983

M. Dorolle (Organisation mondiale de la santé) : Je vous remercie, Monsieur le Président, de donner à l'Organisation mondiale de la santé l'occasion de dire quelques mots au sujet du point en discussion : formation du personnel de recherche dans le domaine de l'énergie nucléaire.

Nous avons dit, et je tiens à le répéter ici, que l'Organisation mondiale de la santé estime que la formation du personnel de protection, aussi bien du point de vue de l'hygiène industrielle que de la protection générale des communautés, est un élément essentiel de tout programme de santé publique à l'heure actuelle. Nous nous rapprochons ici du point de vue de l'UNESCO et je suis heureux d'avoir entendu mon collègue de cette organisation insister sur la nécessité de donner au personnel, même purement technique, des données sur les éléments biologiques du problème.

Les organisations internationales, comme on vous l'a dit au sujet de l'UNESCO, sont prêtes, comme elles le font dans d'autres disciplines, à aider les pays à organiser l'enseignement de leur personnel dans ces domaines et en particulier, à appliquer leurs méthodes de bourses d'études, d'envoi de professeurs, de groupes d'étude, de projets de démonstration, etc. Ceci se rattache d'ailleurs au point qui a été traité tout à l'heure et qui est celui de la coopération internationale. Il est hors de doute que, sur ce point comme sur d'autres, les organisations de la famille des Nations Unies — je parle ici au nom de l'Organisation mondiale de la santé — sont prêtes à apporter leur aide, dans les limites de leur compétence et de leurs ressources, aux pays qui désireront faire appel à elles pour organiser leurs programmes.

M. Ahmad (Pakistan) : Je tiens à déclarer, tout d'abord, que ma délégation s'associe entièrement aux paroles qu'a prononcées le représentant du Mexique au sujet de la très heureuse manière dont le Président de cette Conférence a dirigé les débats, et au sujet de la précieuse expérience que tous les participants en auront retiré. Je puis ajouter que notre délégation a beaucoup gagné aux contacts

extrêmement utiles qu'elle a pu avoir avec d'autres délégations; nous espérons qu'à l'avenir ces contacts seront encore renforcés et que nous en tirerons le maximum d'avantages.

A propos de la formation du personnel, j'aimerais présenter une suggestion qui offrirait, je crois, un intérêt particulier pour les pays sous-développés, tel le Pakistan. Nous avons eu ici le privilège de voir les progrès extraordinaires que les pays les plus avancés ont accomplis au cours de ces dix dernières années dans le domaine atomique et il ne nous en est apparu que plus urgent d'accélérer notre propre développement. Nous sommes convaincus de pouvoir y arriver si les pays les plus avancés — que nous félicitons de leurs succès — voulaient bien nous prêter leur concours, afin que l'humanité tout entière puisse bénéficier de ce développement vraiment remarquable de la science et qu'il ne demeure pas de grandes régions qui, parce qu'elles seraient négligées, pourraient devenir des foyers de tension et, partant, des sources de conflits et de luttes.

La suggestion que je voudrais présenter est la suivante : on pourrait atteindre le but que je viens de citer en établissant, dans les zones sous-développées, des centres régionaux où les populations des pays intéressés pourraient, avec l'assistance de l'Organisation des Nations Unies ou des institutions spécialisées des Nations Unies, entreprendre pour leur propre bénéfice, sous la direction technique d'experts venus des pays plus avancés, l'étude de problèmes d'intérêt commun, tels que ceux des zones arides, de la conservation des forêts, de l'utilisation des isotopes en agriculture, en médecine et dans le domaine sanitaire. Les experts en question pourraient profiter de leur présence dans ces centres pour donner une formation technique aux populations des pays intéressés, ce qui diminuerait la demande dont font l'objet les centres de formation existants, et qui a été signalée par les représentants des États-Unis d'Amérique, du Royaume-Uni et d'autres pays. Ainsi, au lieu que les étudiants de très nombreux pays se rendent dans quelques pays plus avancés, les experts de ces pays pourraient venir dans ces centres régionaux; de cette manière, le domaine de la formation scientifique serait élargi.

L'UTILISATION DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE A DES FINS PACIFIQUES

ACTES DE LA CONFÉRENCE INTERNATIONALE DE GENÈVE, AOÛT 1955

On trouvera ci-après la liste complète des seize volumes de la collection, avec l'indication des principales questions traitées dans chacun des volumes.

Volume I

Besoin du monde en énergie et rôle de l'énergie nucléaire

Les besoins du monde en énergie
Investissements nécessaires dans le domaine de l'énergie nucléaire
Le rôle du thorium
Le rôle de l'énergie électronucléaire dans les cinquante prochaines années
Instruction et formation du personnel en matière d'énergie nucléaire
Etude économique de la production d'énergie électronucléaire

Volume II

Physique et piles de recherche

Questions préliminaires de physique nucléaire
Physique de la fission
Piles de recherche
Description de piles de recherche

Volume III

Génératrices nucléaires

Cycles de combustion
Centrales électronucléaires : résultats acquis
Projets de génératrices nucléaires
Prototypes de génératrices nucléaires

Volume IV

Principales sections efficaces servant à l'étude des piles

Appareils et méthodes utilisés pour la mesure des sections efficaces
Sections efficaces des matières non fissiles; neutrons retardés
Sections efficaces des matières fissiles
Propriétés des matières fissiles

Volume V

Physique des piles

Mesures globales
Intégrales de résonance
Empoisonnement par les produits de fission
Réactivité des solutions
Expériences exponentielles et piles d'énergie nulle
Piles d'énergie nulle à neutrons rapides; cinétique des piles
Théorie des piles

Volume VI

Géologie de l'uranium et du thorium

Réserves naturelles d'uranium et de thorium
Prospection de l'uranium et du thorium

Volume VII

Chimie nucléaire et effets des rayonnements

Le mécanisme de la fission
Installations pour la manutention des matières fortement radioactives
Chimie des produits de fission
Chimie des éléments lourds
Effets des rayonnements sur les matériaux constitutifs des piles
Effets des rayonnements sur les liquides
Effets des rayonnements sur les solides

Volume VIII

Matériaux : Problèmes et techniques de préparation

Traitement des minerais et des concentrés d'uranium et de thorium
Préparation de l'uranium et du thorium sous forme métallique
Méthodes d'analyse utilisées dans la préparation des matières premières
Techniques de préparation des matériaux spéciaux

Volume IX

Matériaux : Essai et traitement chimique

Problèmes de l'évacuation des déchets
Métallurgie du thorium, de l'uranium et de leurs alliages
Fabrication des cartouches actives
Technologie des métaux liquides
Problèmes de chimie concernant les piles atomiques
Traitement chimique des cartouches actives irradiées
Traitement et évacuation des déchets
Séparation et stockage des produits de fission

Volume X

Les isotopes radioactifs et les rayonnements nucléaires en médecine

Les radioisotopes en médecine et en biologie
Thérapeutique
Diagnostic et études cliniques

Volume XI

Effets biologiques des rayonnements

Nature des lésions par irradiation et dangers des rayonnements
Mécanisme de l'action biologique des rayonnements
Protection et restauration
Effets génétiques
Conséquences pour l'homme

Volume XII

Les isotopes radioactifs et les rayonnements ionisants en agriculture, en physiologie et en biochimie

Les radioisotopes en agriculture
Mutations provoquées par irradiation et amélioration des espèces végétales
Les traceurs radioactifs dans la recherche agricole
Physiologie animale
Biochimie végétale
Biochimie générale

Volume XIII

Problèmes juridiques, administratifs et sanitaires. Normes de sécurité

Problèmes juridiques et administratifs
Sécurité des piles et implantation des génératrices nucléaires
Normes de sécurité et problèmes d'hygiène que pose un emploi industriel de l'énergie atomique

Volume XIV

Les isotopes radioactifs : Problèmes généraux et dosimétrie

Les radioisotopes dans la science et l'industrie
Applications générales, préparation et manutention des isotopes radioactifs
Dosimétrie

Volume XV

Les isotopes radioactifs et les produits de fission dans la recherche et l'industrie

Les isotopes radioactifs dans la recherche
Les isotopes radioactifs dans le contrôle et la recherche technique
Les produits de fission et leurs applications

Volume XVI

Séances générales, conférences spéciales et répertoire des actes

Séances d'ouverture et de clôture
Conférences spéciales du soir
Listes des membres du Bureau, des délégations et du Secrétariat de la Conférence
Règlement intérieur de la Conférence
Liste numérique des mémoires
Index des noms d'auteurs