

**PROCEEDINGS OF THE UNITED NATIONS CONFERENCE  
ON NEW SOURCES OF ENERGY**

**SOLAR ENERGY, WIND POWER AND GEOTHERMAL ENERGY  
Rome, 21-31 August 1961**

**VOLUME 6. SOLAR ENERGY: III**

**ACTES OFFICIELS DE LA CONFÉRENCE DES NATIONS UNIES  
SUR LES SOURCES NOUVELLES D'ÉNERGIE**

**ÉNERGIE SOLAIRE, ÉNERGIE ÉOLIENNE ET ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE  
Rome, 21-31 août 1961**

**VOLUME 6. ÉNERGIE SOLAIRE : III**



**UNITED NATIONS/NATIONS UNIES  
New York, 1964**

E/CONF.35/7

UNITED NATIONS PUBLICATION

Sales No.: 63. I. 40

Price : \$ U.S. 5,00  
(or equivalent in other currencies)

PUBLICATION DES NATIONS UNIES

Numéro de vente : 63. I. 40

Prix : 5.00 dollars (USA)  
(ou l'équivalent en monnaie du pays)

## INTRODUCTION

The United Nations Conference on New Sources of Energy was held in Rome from 21 to 31 August 1961. A brief review of the proceedings, of the papers submitted to the Conference and of the related discussions has been printed in *New Sources of Energy and Energy Development: Report on the United Nations Conference on New Sources of Energy*.<sup>1</sup> That publication also contains the agenda and the lists of participants and conference officers, as well as lists of all the Papers and reports.

The Proceedings of the Conference comprise seven volumes, as follows :

- Volume 1. General sessions.
- Volume 2. Geothermal energy : I.
- Volume 3. Geothermal energy : II.
- Volume 4. Solar energy : I.
- Volume 5. Solar energy : II.
- Volume 6. Solar energy : III.
- Volume 7. Wind power.

The present volume, "Solar energy : III", contains the papers and reports relating to the following agenda items : III.D. Use of solar energy for cooling purposes; III.E. Use of solar energy for production of fresh water; III.F. Use of solar energy for high temperature processing (solar furnaces).

The rapporteurs' general reports and their summations of the proceedings in connexion with each

<sup>1</sup> United Nations publication, Sales No.: 62.I.21.

agenda item are given in full in both English and French, as are those individual papers that were submitted to the Conference in both languages. With a few exceptions, all the papers are summarized in both English and French.

Within each agenda item, the papers are printed in the alphabetical order of the authors' names. References supplied by the authors are listed after the text. As a rule, they are numbered consecutively throughout each paper and are indicated by arabic figures in parentheses.

The reports and papers are printed in the form in which they were presented to the Conference, and the affiliations of the participants are those in effect at that time. Corrections to the papers have been incorporated; some of the figures have been rearranged; and minor editorial changes have been made.

The views and opinions expressed are those of the individual authors and do not imply the expression of any opinion on the part of the Secretariat of the United Nations.

The symbols appearing after the titles of the papers and reports, and in references to them in the text, correspond to the symbols under which they were presented at the Conference. They have been here abbreviated by the elimination of the prefix "E/CONF.35/", which should be included in all full references.

## INTRODUCTION

La Conférence des Nations Unies sur les sources nouvelles d'énergie s'est tenue à Rome du 21 au 31 août 1961. Le document intitulé *Sources nouvelles d'énergie et production d'énergie : Rapport sur les travaux de la Conférence des Nations Unies sur les sources nouvelles d'énergie*<sup>1</sup> donne un aperçu des travaux, des mémoires soumis à la Conférence et des débats dont ceux-ci ont fait l'objet. Il contient en outre l'ordre du jour, la liste des membres du Bureau et des autres personnes ayant pris part à la Conférence, ainsi qu'une liste de tous les mémoires et rapports présentés.

Les Actes officiels de la Conférence comprennent les sept volumes suivants :

- Volume 1. Sessions générales.

- Volume 2. Énergie géothermique : I.
- Volume 3. Énergie géothermique : II.
- Volume 4. Énergie solaire : I.
- Volume 5. Énergie solaire : II.
- Volume 6. Énergie solaire : III.
- Volume 7. Énergie éolienne.

Le présent volume, « Énergie solaire : III », groupe les mémoires et rapports ayant trait aux points suivants de l'ordre du jour : III.D. Emploi de l'énergie solaire pour la production de froid; III.E. Emploi de l'énergie solaire pour la production d'eau douce; III.F. Application de l'énergie solaire aux opérations à haute température (fours solaires).

Les rapports généraux des rapporteurs et le résumé des débats sur chaque point de l'ordre du jour qui a été établi par le rapporteur intéressé sont donnés

<sup>1</sup> Publication des Nations Unies, numéro de vente : 62.I.21.

intégralement, en anglais et en français, ainsi que les mémoires qui ont été soumis à la Conférence dans les deux langues. Sauf quelques exceptions, ils sont tous résumés en anglais et en français.

Pour chaque point de l'ordre du jour, les mémoires sont classés dans l'ordre alphabétique des noms d'auteurs. La liste des références fournies par les auteurs figure à la suite du texte. D'une façon générale elles sont numérotées consécutivement pour chaque mémoire, et sont indiquées par des chiffres arabes entre parenthèses.

En règle générale, les rapports et mémoires sont publiés sous la forme dans laquelle ils ont été présentés à la Conférence, et les fonctions indiquées

pour chaque participant sont celles qu'il occupait à cette époque. Toutefois, les corrections nécessaires ont été apportées et certaines figures ont été remaniées; des modifications de rédaction mineures ont de même été faites.

Les vues exprimées n'engagent que leur auteur et n'impliquent aucune prise de position de la part du Secrétariat de l'Organisation des Nations Unies.

Les cotes indiquées après les titres des mémoires et des rapports, ainsi que dans les renvois qui y sont faits dans le texte, correspondent aux cotes utilisées pour la Conférence. On les a cependant abrégées en éliminant « E/CONF.35 », qui doit être maintenu dans les cas où la référence complète est donnée.

TABLE OF CONTENTS \* — TABLE DES MATIÈRES \*

*Agenda item III.D*

USE OF SOLAR ENERGY FOR COOLING PURPOSES

*Point III.D de l'ordre du jour*

EMPLOI DE L'ÉNERGIE SOLAIRE POUR LA PRODUCTION DE FROID

General report — Rapport général		<i>Page</i>
GR/18 (S)	Use of solar energy for cooling purposes . . . . .	Tabor 3
	<i>Emploi de l'énergie solaire pour la production de froid . . . . .</i>	9
	Reporters' summation . . . . .	Tabor 16
	Résumé du rapporteur . . . . .	18
Individual papers — Mémoires		
S/82	Cooling with solar energy. . . . .	Chung, Duffie 20
	<i>Emploi de l'énergie solaire pour la réfrigération (résumé) . . . . .</i>	29
<b>III.D.1</b>		
S/70	Unité frigorifique à absorption avec réflecteur conoïdal fixe. . . . .	Oniga 31
	<i>Absorption cooling unit with fixed conoidal reflector . . . . .</i>	41
S/109	Bilan économique de la fabrication de glace avec un appareil à absorption utilisant le soleil comme moyen de chauffage . . . . .	Trombe, Foëx 51
	<i>Economic balance sheet of ice manufacture with an absorption machine utilizing the sun as the heat source . . . . .</i>	56
<b>III.D.2</b>		
S/88	The Altenkirch solar-cooled house . . . . .	Adler, Levite, Tabor 60
	<i>La maison à refroidissement solaire d'Altenkirch (résumé). . . . .</i>	65
S/37	Engineering and economic study of the use of solar energy especially for space cooling in India and Pakistan . . . . .	Ashar, Reti 66
	<i>Recherches techniques et économiques sur les utilisations de l'énergie solaire, plus particulièrement en vue de la climatisation des locaux en Inde et au Pakistan (résumé) . . . . .</i>	74
S/76	Étude d'une maison solaire Saharienne. . . . .	Crausse, Gachon 75
	<i>Study of a Saharan solar house. . . . .</i>	81

\* The first title refers to the original language; wherever appropriate, the translation follows in italics.  
Le premier titre est celui de la version originale; il est suivi, le cas échéant, de sa traduction en caractères italiens.

		<i>Page</i>
S/39	Prospects for solar air conditioning in Australia . . . . .	Sheridan 87
	<i>Perspectives en ce qui concerne le conditionnement d'air utilisant l'énergie solaire en Australie (résumé)</i> . . . . .	96
S/64	Utilisation de l'énergie solaire pour la réalisation simultanée de la distillation de l'eau saumâtre et la climatisation des serres en zones arides . . . . .	Trombe, Foëx 98
	<i>Utilization of solar energy for simultaneous distillation of brackish water and air-conditioning of hot-houses in arid regions</i> . . . . .	104
S/111	Principes de climatisation des maisons dans les pays à ciel clair . . . . .	Trombe, L. Blanchetais 110
	<i>Principles of air-conditioning in countries with a clear sky</i> . . . . .	123

*Agenda item III.E*

**USE OF SOLAR ENERGY FOR PRODUCTION OF FRESH WATER**

*Point III.E de l'ordre du jour*

**EMPLOI DE L'ÉNERGIE SOLAIRE POUR LA PRODUCTION D'EAU DOUCE**

**Rapport général — General report**

GR/19 (S)	Emploi de l'énergie solaire pour la production d'eau douce . . . . .	Gomella 139
	<i>Use of solar energy for the production of fresh water</i> . . . . .	157
	Résumé du rapporteur . . . . .	Gomella 174
	Rapporteur's summation . . . . .	176

**Individual papers — Mémoires**

S/119	Solar distillers . . . . .	Baum 178
S/73	Quelques expériences sur la distillation solaire de l'eau à petite échelle . . . . .	Fontan, Barasoain 189
	<i>Some examples of small-scale solar distillation of water (summary)</i> . . . . .	196
S/107	Possibilités d'extension des dimensions des distillateurs solaires . . . . .	Gomella 197
	<i>Possibilities of increasing the dimensions of solar stills (summary)</i> . . . . .	204
S/14	Forced-convection, multiple-effect solar still for desalting sea and brackish waters . . . . .	Grune, Collins, Thompson 205
	<i>Alambic solaire à multiple effet et à convection forcée pour le dessalage des eaux de mer et saumâtres (résumé)</i> . . . . .	217
S/63	Demineralization of saline water by solar radiation in the United Arab Republic . . . . .	Hafez, Elnesr 219
	<i>Déminéralisation des eaux saumâtres par le rayonnement solaire dans la République arabe unie (résumé)</i> . . . . .	223
S/23	Évaporateurs et distillateurs solaires au Chili . . . . .	Hirschmann 224
	<i>Solar evaporation and distilling plants in Chile (summary)</i> . . . . .	237
S/29	Solar distillation research at the University of California . . . . .	Howe 239
	<i>Recherches sur la distillation solaire à l'Université de Californie (résumé)</i> . . . . .	248

		<i>Page</i>
S/28	A large scale, low cost, solar heat collector and its application to sea water conversion . . . . .	Hummel 249
	<i>Un collecteur de chaleur solaire de grandes dimensions et de prix modique; son application à la conversion de l'eau de mer en eau douce (résumé)</i> . . . . .	255
S/115	Experiments on demineralisation of water in north India . . . . .	Khanna, Mathur 257
	<i>Expériences sur la déminéralisation de l'eau en Inde Septentrionale (résumé)</i> . . . . .	260
S/89	Entartrage et incrustation dans les distillateurs solaires . . . . .	Lejeune 262
S/77	Application of theoretical principles in improving the performance of basin-type solar distillers . . . . .	Löf 266
	<i>Application de principes théoriques en vue d'améliorer le rendement de distillateurs solaires du type bassin (résumé)</i> . . . . .	275
S/113	Present status and future of the solar stills . . . . .	Nebbia 276
	<i>État actuel et avenir des alambics solaires (résumé)</i> . . . . .	281
S/85	Developments in solar distillation — United States Department of the Interior . . . . .	Strobel 282
	<i>Progrès réalisés dans la distillation solaire (Département de l'intérieur des États-Unis) (résumé)</i> . . . . .	301

**Agenda item III.F**

**USE OF SOLAR ENERGY FOR HIGH TEMPERATURE PROCESSING  
(SOLAR FURNACES)**

**Point III.F de l'ordre du jour**

**APPLICATION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE AUX OPÉRATIONS  
A HAUTE TEMPÉRATURE (FOURS SOLAIRES)**

**Rapport général — General report**

GR/20 (S)	Application de l'énergie solaire aux opérations à haute température (fours solaires) . . . . .	Trombe 307
	<i>Use of solar energy for high-temperature processing (solar furnaces)</i> . . . . .	316
	Résumé du rapporteur . . . . .	Trombe 325
	Rapporteur's summation . . . . .	326

**Mémoires — Individual papers**

S/108	Traitement sous haut vide au four solaire: dispositif expérimental, préparation et étude de nouveaux composés des terres rares . . . . .	Achard 327
	<i>High vacuum treatment in the solar furnace: experimental set-up, preparation and study of new rare-earth compounds (summary)</i> . . . . .	334
S/79	Image quality and use of the United States Army Quartermaster solar furnace . . . . .	Cotton, Lynch, Zagieboylo, Davies 336
	<i>Qualité de l'image et utilisation du four solaire du service de l'Intendance de l'armée des États-Unis (résumé)</i> . . . . .	347

		<i>Page</i>
S/66	Mesure des températures au four solaire . . . . .	Foëx 349
	<i>Temperature measurements in the solar furnace (summary)</i> . . . . .	358
S/16	Industrial applications — the challenge to solar furnace research. <i>Les applications industrielles : un défi aux chercheurs qui se consacrent aux fours solaires (résumé)</i> . . . . .	Glaser 360 370
S/5	New techniques and possibilities in solar furnaces . . . . .	Laszlo 372
	<i>Nouvelles techniques et perspectives dans le domaine des fours solaires (résumé)</i> . . . . .	383
S/48	Étude sur les concentrations énergétiques données par les miroirs paraboliques de très grande surface . . . . .	Phat-Vinh 386
	<i>Study of the energy concentrations yielded by very large parabolic mirrors (summary)</i> . . . . .	392
S/25	Chemical syntheses in the solar furnace . . . . .	Marius, Wohlers 393
	<i>Synthèses chimiques dans le four solaire (résumé)</i> . . . . .	398
S/57	Applied research in a solar furnace . . . . .	Nakagishi, Mizuno, Nakamura, Hayashi 400
	<i>Recherches appliquées dans un four solaire (résumé)</i> . . . . .	406
S/21	Construction of a large solar furnace . . . . .	Saito, Shishido, Kobayashi, Inagaki 407
	<i>Construction d'un four solaire de grandes dimensions (résumé)</i> . . . . .	414
S/35	Conditions de traitement et mesures physiques dans les fours solaires. . . . .	Grombe, Foëx, Blanchetais 415
	<i>Treatment conditions and physical measurements in solar furnaces (summary)</i> . . . . .	429
S/52	Purification des substances par chauffage au four solaire . . . . .	Grombe, Foëx 432
	<i>Purification of substances by heating in a solar furnace (summary)</i> . . . . .	439
S/81	Les applications pratiques actuelles des fours solaires et leurs possibilités économiques de développement . . . . .	Grombe, Foëx 441
	<i>Practical applications of solar furnaces today and economic possibilities of their development (summary)</i> . . . . .	449
S/36	Obtention de carbure de bore et traitement thermique de minéraux au four solaire . . . . .	Vuillard 451
	<i>Production of boron carbide and heat treatment of minerals by solar furnaces (summary)</i> . . . . .	454



## EXPLANATORY NOTE

The following symbols have been used in this volume :

A full stop (.) is used to indicate decimals; spaces are inserted to distinguish thousands and millions.

In most cases abbreviations used by the authors have been retained.

For conversion factors to be used in obtaining metric equivalents of British units, or British equivalents of metric units, see *World Weights and Measures*, prepared by the Statistical Office of the United Nations in collaboration with the Food and Agriculture Organization of the United Nations (Statistical Papers: Series M, No. 21; United Nations publication, Sales No. : 1955.XVII.2).

## NOTE EXPLICATIVE

Les signes suivants ont été employés dans ce volume :

La virgule (,) indique les décimales; les espaces entre les chiffres distinguent les milliers et les millions.

Dans la plupart des cas, les abréviations utilisées par les auteurs ont été retenues.

Pour la conversion des mesures métriques en mesures anglaises et pour l'opération inverse, consulter la brochure *World Weights and Measures*, que le Bureau de statistique des Nations Unies a établi avec le concours de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (Études statistiques : série M, n° 21; publication de l'ONU, numéro de vente : 1955.XVII.2).

*Agenda item III.D*

**USE OF SOLAR ENERGY FOR COOLING PURPOSES**

*Point III.D de l'ordre du jour*

**EMPLOI DE L'ÉNERGIE SOLAIRE POUR LA PRODUCTION DE FROID**

*Chairman — Président*

**Teodoro ONIGA**

*Rapporteur*

**Harry TABOR**

## USE OF SOLAR ENERGY FOR COOLING PURPOSES

Harry Tabor \*

The use of solar energy for cooling purposes, whether of food or of dwellings, has a two-fold attraction:

(a) The demand for cooling is generally greatest at times of maximum solar intensity, in contrast to the use of solar energy for winter heating of dwellings.

(b) The cooling of food and of man is more important in hot than in cold regions. Refrigeration and air conditioning that might otherwise be considered luxuries may, in fact, become necessities for the development of hot under-developed countries.

It is thus not surprising that on the subject of solar cooling, studies are being conducted in various research institutes. It is helpful for the discussion to clarify certain general concepts.

Firstly, the use of conventional electrically operated compression cooling machines, with the electric power provided by a solar power plant, need not concern us here because this is entirely a problem of solar power.

Secondly, any solar cooling system comprises two parts: the cooling machine or mechanism and the solar heat source to operate it. (Only heat-operated systems are considered, as no other practical means of harnessing sunshine in the amounts required have been proposed.)

A number of heat operated cooling and air-conditioning systems are already known, such as absorption systems, dehumidification systems, jet ejectors and the like, which are conventionally operated by sources of heat such as gas or kerosene (occasionally electricity). It is hardly to be expected, therefore, that solar scientists will suddenly produce new devices of this kind that are vastly superior to those already produced in a competitive technological world. Rather the problem is that, because solar heat has certain limitations compared with fuel, i.e., intermittancy, low energy concentration, difficulty of control etc., the solar operated cooling device may have to be specially designed to suit the characteristics of solar heat collectors.

As an example of the difference between a solar cooling device and a fuel operated device, we consider an absorption cooling unit. According to the system chosen and the type of cooling required (e.g., air conditioning or ice production) the energy input temperature may be 60° or 90° or 120°C. As far as fuel heating is concerned, these various temperatures do not create any problems but when solar

heat is used there is a profound difference. Whilst 60°C can readily be obtained from a flat plate solar collector, the higher temperatures mean lower collector efficiencies or more sophisticated (and hence more expensive) collectors.

If, therefore, we recognise that a solar cooling device can be considerably less efficient, but never more efficient, than a fuel operated device, we have a measure of the limits that can be approached but not exceeded in solar cooling devices.

For the source of heat we require some form of solar collector and must borrow from the experience gained in other aspects of solar energy utilisation such as solar water heating and solar power.

## Technical and theoretical aspects

## THE HEAT SOURCE

Experience already gained in solar collectors has brought out several points.

1. The collection efficiency of solar collectors decreases with increase in temperature of the output.

2. Present day flat plate collectors are satisfactory for temperatures up to about 70-80°C under favorable climatic conditions. For example, for a typical flat plate collector under bright sunshine conditions,<sup>1</sup> the daily collection efficiency  $E$  has been computed as follows:

$$E = 0.71 - 0.003 \Delta T^\circ F = 0.71 - 0.0054 \Delta T^\circ C$$

where  $\Delta T$  is the temperature rise above ambient. Thus for a temperature rise of 39°C the efficiency is down to 50 per cent. For a rise of 70°C the efficiency is down to 33 per cent. These results are for a good collector in clear strong sunlight. Many practical collectors give much poorer results.

3. Focussing collectors which track the sun can give much higher temperatures. However, it is extremely unlikely that a tracking collector would be acceptable for domestic needs, except for rather primitive applications and where the collection time is short. (Paper S/82 deals with a domestic solar refrigerator where regeneration is effected during

<sup>1</sup> Assumptions: Single water-white cover glass; selective absorber emissivity 0.12, absorptivity 0.92; 5 cm rear insulation; large area collector, no edge losses; 10 per cent losses in extraction, shading, dirt etc.; mean solar intensity during sunshine hours 200 btu per hr, ft<sup>2</sup> or 74 kcals per hr, m<sup>2</sup>. Efficiency is for "boiling", i.e., the whole collector is approx. at 50 per cent of the output temperature (1, 2).

\* Director, National Physical Laboratory of Israel, Jerusalem.

a period of about 2 hours using a paraboloidal mirror.)

4. Cylindrical parabolic mirrors can give temperatures between those obtained from flat plate collectors and those obtained by fully sun-tracking focusing collectors. If the optical concentration is limited to about 3, no daily adjustment is needed for about 7-8 hours of collection, through seasonal adjustment of tilt is required (3) and collection efficiencies of the order of 40 per cent can be obtained for temperature rises of 100-130°C above ambient. A higher optical concentration, giving better efficiency at the same temperature (or permitting the omission of a glass cover on the receiver), is possible if one is prepared to make periodic adjustments of the mirror during the day. In Paper S/109, such a system is used for ice making. The tilt of the mirror must be adjusted 5-6 times on the solstice days, less on other days and not at all on the equinox days.

5. The problem of elevated temperatures is less important in cooling machines than in solar power units (where the higher the temperature the better), but it is, nevertheless, significant, particularly as the domestic user of a solar device will demand a simpler system than, say, the operator of a solar power unit supplying a village.

6. Solar collectors are not as cheap as one would like and much work still has to be done to decrease their first cost and increase their longevity.

### THE COOLING DEVICE

As mentioned before, a solar cooling device will be similar to any other heat operated cooling device except for the added limitations imposed by the solar source of heat.

Heat operated coolers are of two classes: the absorption cycle and other cycles related to it and the jet compression cycle.

#### *The absorption cycle*

This is a well-known and technically successful system, exemplified by the units built by Electrolux, Servel (Arkla) and others. Large commercial units and small units giving sub-zero temperatures (i.e., for refrigeration) usually use water as the absorber and ammonia as the refrigerant. For air conditioning, i.e., above-zero temperature, the lithium bromide-water combination is popular.

In all absorption cycles, heat at a temperature  $T_g$ , the generator temperature, is supplied whilst heat is extracted at the evaporator where "cold" is produced at a temperature  $T_e$ . Heat is rejected from the system to the surroundings (outside the space to be cooled) from a condenser at temperature  $T_c$  and from an absorber, at temperature  $T_a$ .  $T_a$  and  $T_c$  are about equal (and will be referred to as  $T_c$ ), being a few degrees above ambient for air-cooled condensers and absorbers (and being a few degrees above local wet-bulb temperature for water-cooled systems).

Two important facts emerge from thermodynamic considerations of the absorption cycle, which are quite independent of the system or materials used.<sup>2</sup>

(a) The amount of heat supplied at the hot end will always be more than the amount of "cold" produced. In an ideal system these quantities approach equality. As the coefficient of performance (COP) of a cooling machine is defined as the ratio of calories extracted at the cold end to the calories of heat supplied, the COP is always less than unity.

(b) The temperature "lift", i.e.,  $T_g - T_e$  is, in an ideal system, approximately equal to the temperature "depression", i.e.,  $T_c - T_e$ . In real systems the lift is always a little greater than the depression. (Examples are given in Paper S/37 where we find that for  $T_e = 55^\circ\text{F}$  and  $T_c = 85^\circ\text{F}$ , i.e., depression of  $30^\circ\text{F}$ ,  $T_g = 118^\circ\text{F}$ , i.e., the lift is  $33^\circ$ ; for  $T_e = 90^\circ\text{F}$  the depression is  $35^\circ$  and the lift  $45^\circ\text{F}$ ; for  $T_e = 100^\circ\text{F}$  the depression is  $40^\circ\text{F}$  and the lift is  $55^\circ\text{F}$ ).

These two facts are vital in appreciating the problem of solar cooling. The first fact indicates the minimum quantity of heat to be supplied from the collector for a given refrigeration effect. Whilst the ideal COP can approach unity, real values are about 0.7 for large industrial plants, falling to about 0.4 for small units (Paper S/82).

The second fact fixes the operating temperature for the generator and hence of the collector. For example, normal air-conditioning practice calls for an evaporator temperature of  $5-5^\circ\text{C}$  ( $40^\circ\text{F}$ ) in order to be able to cool the air down with a small heat transfer surface on the evaporator. If the ambient temperature in the summer is, say,  $30^\circ\text{C}$ , and it could easily be more, thus making  $T_c$  about  $35^\circ\text{C}$ , we see that the depression is  $35-5 = 30^\circ\text{C}$ . The lift will therefore be in the region of  $40-45^\circ\text{C}$ , making the generator temperature  $75^\circ\text{C}-80^\circ\text{C}$ . The collector will be a little hotter. This is rather high for a flat plate collector.

This point has been appreciated in Paper S/37 where the authors make the evaporator temperature  $55^\circ\text{F}$  instead of  $40^\circ\text{F}$ , thereby necessitating an increase in the size of the evaporator surface, but reducing the generator temperature, i.e., for  $T_e = 95^\circ\text{F}$  ( $35^\circ\text{C}$ ) the depression is  $40^\circ\text{F}$  and the lift  $55^\circ\text{F}$  making  $T_g = 140^\circ\text{F}$  ( $50^\circ\text{C}$ ) which is a reasonable temperature for a flat plate collector. We observe at once that as the lift is a little greater than the depression, a rise of  $1^\circ$  in  $T_c$  results in a rise of about  $2\frac{1}{2}^\circ$  at the generator. The authors of Paper S/27 have, of course, used water cooling to get the condenser temperature to  $95^\circ\text{F}$  or even lower. Were

<sup>2</sup> These facts apply to "single stage" systems. Multiple stage systems can give different results. Higher COPs can be obtained at the expense of greatly elevated generator temperatures. Whilst some experiments are being pursued on such systems, no commercial units are presently built using multi-stage systems because of the increased complexity. With the generator temperature at about  $180^\circ\text{C}$  for a two stage system and a COP about twice the usual value, it is very doubtful if it could be justified for solar operation unless solar calories were so much more expensive than fuel calories that heat economy might become the key factor in over-all cost.

air-cooling used,  $T_c$  would shoot up to well over 100°F in the summer, thereby requiring generator and collector temperatures considerably higher than 140°F. Thus, by using water cooling, which may not be too popular in some areas, and the highest possible evaporator temperature, the authors have been able to consider flat plate collectors where otherwise these could not have been used efficiently.

We note at once that the relationship of temperature lift to temperature depression makes it virtually impossible to operate a refrigerating cycle (i.e., subzero temperatures) with a flat plate collector. Thus the papers dealing with solar refrigerators (S/82, S/70, S/109) all indicate focusing collectors for obtaining subzero temperatures.

A full discussion of all the types of cooling considered is not possible here and reference should be made to the original papers. As is to be expected, every system has advantages and disadvantages. The lithium bromide-water system is probably the best for air conditioning as it is a well-tryed system, but it cannot provide subzero temperatures and is therefore inapplicable for ice making and food refrigeration. The water-ammonia system is established in this field and for large plants gives a good COP. However in commercial small units, i.e., domestic refrigerators, the COP is much lower<sup>3</sup> so there is room for further research taking into account that in a solar unit it is the total capital cost (cooler plus collector) which must be minimised. Thus, Prof. Daniels has started some studies on the combination of sodium thiocyanate as absorber and ammonia as the refrigerant instead of water and ammonia. The possible advantages are that lower pressures result, permitting a lighter structure, and, as the absorber does not vaporise, the rectification needed in water-ammonia systems to prevent distilling over of water is eliminated.

#### *Intermittent and continuous cycles*

The earliest absorption machines were intermittent in operation. The refrigerant was first boiled out of the generator and condensed; then it was expanded in the evaporator and reabsorbed to return the generator to its original condition. Intermittent behaviour was not viewed kindly by the user, so continuous cycles were developed whereby regeneration goes on simultaneously with the other processes and there is no interruption of the cooling effect.

Solar radiation is itself intermittent and it was thus natural to consider, once again, intermittent absorption cycles. These are well described in Paper S/82 and the simplest refrigerator comprises two spherical containers at the ends of a connecting tube, and containing an absorber-refrigerant solution. For a period of 2 hours one sphere, containing all the solution, is heated in the focus of a solar mirror, the ammonia being distilled over into the other

sphere. This sphere is then put in the cold box and the evaporation of the ammonia on its way back to being absorbed in the first sphere (now at ambient temperatures) produces the desired cooling effect which can last most of the remaining 22 hours of the day. The COP is rather low, about 0.4, because there are no heat-recovery exchangers used. The unit is rather heavy to manipulate. With some improvement in performance and reduction in internal pressure and weight, such a system might be quite attractive for under-developed countries where the manual manipulation, including periodic adjustment of the solar mirror during regenerating, would be acceptable. The mirror, which has about 40 per cent heating efficiency, can probably also be improved.

The continuous cycles are, of course, more complicated and one problem is the circulation of the working fluids. When electricity is available, small pumps are used, but where there is no electric power the system has to pump itself by some form of thermopump. This is not possible with all systems and constitutes a further limitation in completely solar-operated absorption machines.

So far we have discussed only "closed cycles"; i.e., where no component in the cycle, other than heat, is consumed and such cycles are essential for refrigeration. For air conditioning, when the "refrigerant" is water, "open" cycles are sometimes used, i.e., water is added or subtracted from the atmosphere. Such systems are often far simpler than closed systems but the COP is low principally because the regeneration process involves heating a great mass of air as well as the absorber and the water vapour. One example in this class is Paper S/88 which describes what appears superficially to be a very simple system of cooling a dwelling — an open intermittent cycle using absorbent material in the walls of the dwelling — but the COP is of the order of 0.10-0.15 so that the heat supply required for operation is very large.

#### *Jet cooling*

High pressure steam is sometimes used for air conditioning machines. By means of a jet pump, a suction is caused in an evaporator and cooling occurs. In effect, this is a compressor type cooling machine, the mechanical compressor being replaced by a jet pump. The wear and tear of mechanical systems is avoided.

The mechanical efficiency of a jet pump increases with the pressure of the steam, i.e., with the temperature, but is far below that of conventional heat engines and pumps,<sup>4</sup> and the performance of jet cooling machines appears to be satisfactory only in large sizes. (Steam jet pumps cannot be used to produce subzero temperatures so that a Freon jet pump would be necessary for refrigeration.)

<sup>3</sup> To avoid the use of mechanical pumps the Plattens-Munther system used on small equipment incorporates an inert gas which inevitably reduces the efficiency.

<sup>4</sup> Jet pumps are used in power station equipment where the emergent steam is used in the process. The mechanical output is low but the thermal efficiency is virtually 100 per cent. Only "temperature" is lost.

Because of the rather high steam temperatures required for efficient operation, the system has not attracted much attention in solar energy research centres, though Ward believes that a reasonable system with 180°F at the collector, can be designed for an evaporator temperature of 60°F with an over-all performance coefficient, including the collector, of 0.3 (4). This is an interesting line of research and should be examined further.

### Economic aspects

Conventional air conditioning is not cheap and there is no reason to expect that solar air conditioning would be vastly cheaper. Domestic refrigeration being a smaller item, the cost factor is less significant.

It has been pointed out that solar cooling is similar to other forms of heat-operated cooling except that the source of heat is from a solar collector whilst the cooling machine will, in general, be somewhat less efficient and perhaps more expensive than a fuel-operated machine.

If, therefore, we assume that, as the result of further research, the solar operated cooling machine can be made for the same cost and with the same COP as a conventional machine, the comparative economics of cooling resolve themselves into the cost of solar calories as compared with calories from fuel.

Let  $Q_s$  = total solar radiation falling on 1 m<sup>2</sup> of collector, during the summer season (kcal per m<sup>2</sup>, season).

$E_c$  = collector efficiency.

$C$  = cost per m<sup>2</sup> of collector US \$.

$J_c$  = annual charges on capital (amortisation and interest).

Then the annual cost  $P_c$  of 10<sup>6</sup> calories of solar heat is:

$$p_c = \frac{C J_c}{Q_s E_c} \times 10^6 \text{ (\$)}$$

If we assume that fuel with a calorific value of  $H$  kcal per ton, costing  $\$K$  per ton, is burned in a furnace with an efficiency  $E_f$ , then the cost  $p_f$  of 10<sup>6</sup> fuel calories is:

$$p_f = \frac{K}{H E_f} \times 10^6$$

Solar heat is thus equal in cost to fuel heat when  $p_f = p_c$ ,<sup>5</sup> i.e., when the fuel cost is

$$K = \frac{H E_c J_c}{Q_s}$$

Inserting some representative values gives a picture of the chances of economic viability.

Assume  $H = 10^7$  kcal per ton.

$E_c = 0.5$ . This is on the high side.

<sup>5</sup> Maintenance costs are arbitrarily assumed to be the same in both cases.

$E_f = 0.7$ . This is low for very large units but high for small ones.

$C = \$20$  per m<sup>2</sup>. This is lower than any present-day collectors but is a fair target price.

$J_c = 0.103$ . Assumed 15 years' life and 6 per cent interest rate and sinking fund. (See paper S/54.)

$Q_s = 10^6$  kcal per m<sup>2</sup>, season. A sunny climate will give about twice this value for the whole year.

Then  $K = \$28.8$  per ton.

This price is about twice the cost of imported fuel oil on a seashore. However, many small consumers in isolated places pay up to 3 times this price for fuel oil or its calorific equivalent delivered.

The sample representative values are optimistic. Flat plate collectors today cost about \$60 per m<sup>2</sup> according to Sheridan (Paper S/39, type B) which might fall to about \$46 if built as part of a roof. Ashar & Reti (Paper S/37) estimate \$24 per m<sup>2</sup> for flat collectors built in India. Focusing collectors are at present more expensive than flat plate collectors, but there are hopes that a price of \$20 per m<sup>2</sup> will be attained by the use of plastics. In this case a 15-year lifetime is unrealistic, six years probably being more reasonable, and this makes  $J_c = 0.203$  or almost twice the assumed value.

The value for  $Q_s$  depends upon the local climate and in particular on the length of the cooling season. For the case of the intermittent solar refrigerator using only two hours of sunshine a day,  $Q_s$  would be only  $0.6 \times 10^6$  kcal per m<sup>2</sup>, even for 365 days' use a year in a clear sky.

The over all picture is, however, encouraging. Wherever fuel is scarce or expensive the solar collector has a chance to compete in the supply of low-temperature calories. In highly developed areas with cheap fuels, solar calories are presently non-competitive.

### Climatisation of dwellings

The Secretariat of this Conference agreed to accept, in this section, papers that dealt with climatisation of buildings even if the systems proposed were not energised by solar energy. There may be circumstances which permit climatisation in a cheaper and simpler manner than by heat-operated machines — whether fuel or solar; further, a comprehensive use of all climatic factors is logical. Thus, for example, hot sunny desert climates often have cold nights and very clear skies. The cold nights can be used to cool down the building by "storing" night cold. The clear skies can be used to cool a building by outgoing radiation from roof and walls to the "cold" sky. Where the climate is hot and dry, evaporative cooling will in general reduce the temperature to a comfortable level, and if the increased humidity causes discomfort, the cool humidified air can be used to cool dry air through a heat exchange surface.

Of course evaporative cooling systems can be very expensive in their use of water.

Finally, it is a problem for the architect to design the dwelling so as to obtain the best compromise between indoor climate and the number of auxiliary aids.

French scientists, thinking in terms of Saharan conditions, have been active in this field and three papers (S/76, S/64, S/111) have been contributed. Paper S/39, from Australia, pays much attention to the house design and considers a solar absorption machine for areas too moist to use evaporative cooling.

Paper S/111 gives an interesting account of how to exploit night radiation to cool a roof and cause cold air to descend into the dwelling, whilst "windows" can be used either for heating purposes (by incident solar radiation) or for cooling by radiation. The selectivity of special surfaces can also be exploited. Selective "hot" surfaces are those which absorb solar radiation but emit little heat, and selective "cold" surfaces those which, being white, absorb little sunshine but may approximate to black body thermal emitters.

Paper S/76 deals with evaporative cooling in a Saharan climate but the cold humidified air passes *inside* the hollow walls of the dwelling thereby cooling the interior of the dwelling without adding moisture.

(The authors correctly point the need to have low heat capacity walls in this special case in contrast to the more usual system, as given in Paper S/39, of having a high wall heat capacity to even out day and night time temperature variations.)

It is suggested that the movement of the air can be caused by solar energy falling on the blackened walls and roof producing a "chimney" effect though it is admitted that if air filters are employed a mechanical fan is needed. (Paper S/88 reports the solar chimney effect in another experimental house as being very small.)

A full analysis may show that, where electricity is available, the solar chimney might be an expensive way of moving air compared with a small fan.

Paper S/64 is a special case of climatisation, i.e., of a hot-house, wherein water trays under the roof permit solar distillation and control of the micro-climate in the hot-house. This paper should prove of great interest to farmers trying to raise special crops in a too-sunny climate.

Economic analysis of these various systems is not presented and much work still has to be done in this field to determine technical practicability and economic justification.

### Conclusions

Solar cooling for food and dwellings is attractive because of the extra value of cooling in sunny climates and the correlation between cooling load and solar intensity.

Of the types of heat-operated cooling devices considered the most promising are the closed cycle absorption machines which should follow conventional design but be modified to suit solar heat sources, in particular to have the lowest possible supply temperature. For air-conditioning the supply temperature may be sufficiently low (60°C) to permit the use of flat plate collectors. Refrigerating units for food preservation or ice-making require higher source temperatures, thus necessitating some form of focusing collector which, apart from the cost, involves more manipulation. Open cycle absorption systems require more input calories and are thus not attractive though their first cost, apart from the collectors, may be low.

Much work still has to be done to establish the best absorption cycles for solar operation but considerable progress has been made.

Jet pump cooling is a possible alternative to the absorption machine and may be cheaper and simpler to construct though the heat consumption is likely to be large, thereby calling for large collectors, unless the jet pump is very skillfully designed and the supply temperature can be kept up. Careful studies and experiments are required to determine whether this relatively untried system is a valid alternative to the absorption systems.

Assuming that cooling machines adapted for operation by solar collectors will ultimately be about as efficient as similar machines operated by fuel, it is seen that the solar operated system cannot at present compete with fuel systems where fuel costs correspond to the normal world price for fuel, but may compete in remote areas where fuel costs are many times the world price.<sup>6</sup> Under these circumstances solar air conditioning may not be far from practical realisation.

A promising development, particularly suitable for more primitive communities in hot areas, is the intermittent absorption cycle domestic refrigerator regenerated by a solar mirror. The improvements needed are a lower pressure system to permit a lighter construction (and reduce the danger of bursting by overheating), an improvement in the COP and a more efficient mirror for regeneration. (The mirror can be used for other purposes, such as solar cooking, when not being used for regeneration.)

Certain auxiliary cooling methods for dwellings should not be overlooked as an aid to solar cooling or even by themselves. These include evaporative cooling in hot dry climates (assuming adequate water supplies) and radiation cooling at night in clear-sky regions, whilst sound design principles in the dwelling construction itself are very important.

<sup>6</sup> It has been suggested that the under-developed nations would do better to invest their capital in good roads and railways, so as to bring down the cost of transported fuel, than in solar devices. This might possibly be true for large solar installations; it is far less likely to be true for large numbers of dispersed small solar devices such as refrigerators and air conditioners.

### Topics for discussion

1. Differences between solar cooling and conventional cooling in the absence of electric power.
2. Possible role of food refrigeration in less-developed countries, with particular reference to small and/or large solar-operated refrigerators and to ice made in solar devices as well as to permissible costs. Importance, if any, of centralized cold storage of food for villages as distinct from individual domestic cold storage.
3. Cooling requirements for human comfort and effect on human productivity, related to degree of

temperature and humidity change that may be worth while and obtainable through solar devices as well as permissible on an intermittent basis.

4. Co-operation between solar specialists and architects in providing designs in themselves contributing to better cooling and incorporating solar devices.

5. "Climatization" for vegetable growth by joint production of fresh water and humidity control in arid areas.

6. Degree of complexity of solar cooling devices acceptable in less-developed countries.

### References

- |   |   |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tabor, H., Solar Energy Collector Design, <i>Bull. Res. Council of Israel</i> 5C No. 1, pp. 5-27, Nov. 1955. Reprinted in <i>Transactions of International Conference on The Use of Solar Energy</i>, Vol. II, Part I, Section A, pp. 1-23.</li> <li>2. Tabor, H., Radiation, Convection and Conduction Coefficients in Solar Collectors, <i>Bull. Res. Council of Israel</i>, Vol. 6C, No. 3, Aug. 1958, pp. 155-175.</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>3. Tabor, H., Stationary Mirror Systems for Solar Collectors, <i>Solar Energy</i>, Vol. II, No. 3-4, July-Oct., 1958.</li> <li>4. Ward, G. T., Possibilities for the Utilisation of Solar Energy in Underdeveloped Rural Areas, F. A. O. Publication, <i>Informal Working Bulletin No. 16</i> Agricultural Engineering, 1960.</li> </ol> |
|---|---|



## EMPLOI DE L'ÉNERGIE SOLAIRE POUR LA PRODUCTION DE FROID

(Traduction du rapport précédent)

Harry Tabor \*

L'emploi de l'énergie solaire pour la production de froid, soit pour protéger les aliments, soit pour climatiser les habitations, présente deux avantages :

a) La demande de froid est généralement la plus élevée lorsque l'intensité solaire est au maximum, ce qui n'est pas le cas lorsqu'il s'agit d'utiliser l'énergie solaire pour chauffer les habitations en hiver;

b) La production de froid pour préserver les aliments et en vue du bien-être des hommes revêt plus d'importance dans les régions chaudes que dans les régions froides. La réfrigération et la climatisation qui, en d'autres circonstances, pourraient être considérées comme un luxe, peuvent en fait devenir indispensables pour le développement de pays chauds sous-développés.

Il n'est donc pas surprenant que divers instituts de recherche effectuent des études sur la production de froid au moyen de l'énergie solaire. L'examen du problème sera plus facile si nous précisons certaines notions générales.

Primo, l'emploi de réfrigérateurs à compression classiques fonctionnant à l'électricité (fournie par une installation d'énergie solaire) ne nous intéresse pas, puisqu'il s'agit uniquement ici d'un problème d'énergie solaire.

Secundo, tout système de réfrigération par énergie solaire comprend deux parties : la machine ou le mécanisme de réfrigération et la source de chaleur solaire qui l'actionne. (Nous n'étudions ici que les systèmes actionnés par la chaleur, car on n'a proposé aucun autre moyen pratique d'utiliser le rayonnement solaire dans les quantités nécessaires.)

On connaît déjà un certain nombre de systèmes de réfrigération et de climatisation actionnés par la chaleur : citons par exemple les systèmes à absorption, les systèmes à déshumidification, les systèmes à mélange, etc. qui utilisent des sources classiques de chaleur, telles que le gaz, ou le pétrole lampant (parfois l'électricité). Il ne faut donc guère s'attendre à ce que les spécialistes de l'énergie solaire mettent au point rapidement de nouveaux procédés qui soient très supérieurs à ceux déjà inventés dans un monde technologique où la compétition est grande. Le problème consiste plutôt à trouver des systèmes

de réfrigération à énergie solaire qui soient spécialement conçus pour s'adapter aux caractéristiques des insolateurs, parce que la chaleur présente certains inconvénients par comparaison avec la chaleur produite par des combustibles : l'intermittence, la faible concentration d'énergie, la difficulté de régulariser la chaleur, etc.

Examinons un appareil réfrigérant à absorption pour illustrer la différence entre un appareil réfrigérant solaire et un appareil utilisant un combustible. Selon le système choisi et le genre de réfrigération requis (par exemple, climatisation de l'air ou production de glace) la température de l'énergie fournie peut être 60° ou 90° ou 120 °C. La production de ces températures ne pose pas de problème lorsqu'il s'agit de chauffage au combustible. Mais lorsqu'on utilise la chaleur solaire, il y a une différence profonde : alors qu'une température de 60 °C peut être obtenue facilement avec un insolateur à plaques plates, les températures plus élevées entraînent une baisse du rendement de l'insolateur, ou l'emploi d'insolateurs plus compliqués, donc plus chers.

Si donc nous admettons qu'un appareil réfrigérateur solaire peut avoir beaucoup moins de rendement, mais jamais plus qu'un appareil utilisant un combustible, nous pouvons mesurer les performances qui peuvent être atteintes, mais ne peuvent être dépassées, avec un appareil réfrigérateur solaire.

La source de chaleur sera un insolateur, et nous devons avoir recours à l'expérience acquise dans d'autres utilisations de l'énergie solaire, telles que le chauffage de l'eau et la production d'énergie.

### Aspects techniques et théoriques

#### LA SOURCE DE CHALEUR

L'expérience déjà acquise en matière d'insolateurs fait ressortir plusieurs points.

1. Le rendement du captage des insolateurs diminue en fonction de l'élévation de la température produite.

2. Les insolateurs à plaques plates d'aujourd'hui ont un rendement satisfaisant pour la gamme des températures allant jusqu'à environ 70 ou 80 °C, dans de bonnes conditions climatiques. Par exemple, dans le cas d'un insolateur à plaques plates typique,

\* Directeur du Laboratoire de Physique d'Israël, Jérusalem.

dans des conditions de bon ensoleillement<sup>1</sup>, le rendement quotidien du captage  $E$  a été calculé comme suit :

$$E = 0,71 - 0,003 \Delta T^{\circ}\text{F} = 0,71 - 0,0054 \Delta T^{\circ}\text{C}$$

où  $\Delta T$  représente l'élévation de la température par rapport à la température ambiante. Ainsi, lorsque la température s'élève de 39 °C, le rendement tombe à 50 p. 100 et pour une élévation de température de 70 °C, le rendement n'est plus que de 33 p. 100. Ces résultats sont valables avec un bon insolateur par temps clair et fort ensoleillement : nombreux sont les insolateurs pratiques qui donnent des résultats beaucoup moins bons.

3. Les insolateurs à foyer qui concentrent les rayons solaires et suivent le soleil peuvent fournir des températures beaucoup plus élevées. Toutefois, il n'est guère vraisemblable qu'un insolateur orienté puisse servir aux besoins domestiques, sauf lorsqu'il s'agit d'applications assez primitives et que le captage est de courte durée. (L'auteur du mémoire S/82 étudie un réfrigérateur solaire domestique où la régénération s'effectue pendant une période d'environ deux heures au moyen d'un miroir parabolique.)

4. Les miroirs cylindro-paraboliques peuvent donner des températures se situant entre celles obtenues au moyen d'insolateurs à plaques plates et celles fournies par des insolateurs à foyer pleinement orientés. Si la concentration optique est limitée à environ 3, il n'est pas nécessaire de régler l'appareil chaque jour (pour 7 à 8 heures de captage), mais il faut régler l'inclinaison suivant les saisons (3) et on peut obtenir des rendements de captage de l'ordre de 40 p. 100 pour des hausses de température de 100 à 130 °C au-dessus de la température ambiante. Une concentration optique plus élevée donnant un meilleur rendement à la même température (ou qui permettrait de supprimer le revêtement en verre du récepteur) est possible si l'on est disposé à régler périodiquement le miroir durant la journée. Le mémoire S/109 décrit un système de ce genre utilisé pour la production de glace; l'inclinaison du miroir doit être réglée 5 à 6 fois aux jours de solstice, moins entre-temps et pas du tout aux équinoxes.

5. Le problème des températures élevées présente moins d'importance dans le cas des appareils de refroidissement que dans celui des groupes producteurs d'énergie solaire (où l'appareil fonctionne d'autant mieux que la température est plus élevée), mais il faut néanmoins en tenir compte, du fait notamment que l'utilisateur domestique d'un appareil solaire exigera un système plus simple que, par

exemple, l'opérateur d'un groupe approvisionnant un village en énergie solaire.

6. Les insolateurs ne sont pas aussi bon marché qu'il le faudrait, et de nombreux travaux devront encore être effectués pour diminuer le coût initial et augmenter la longévité de l'appareil.

#### L'APPAREIL DE RÉGÉNÉRATION

Comme nous l'avons déjà dit, un appareil de réfrigération solaire sera analogue à tout appareil de réfrigération utilisant le refroidissement, si ce n'est qu'il comporte certaines limitations d'emploi supplémentaires dues à la source solaire de chaleur.

Les réfrigérateurs utilisant la chaleur sont de deux sortes : le cycle à absorption (et les autres cycles qui en dérivent) et le cycle à injection.

##### *Le cycle à absorption*

C'est un procédé bien connu qui donne de bons résultats techniques; il est utilisé dans les appareils construits par Electrolux, Sorbus (Arklat) et autres fabricants. Les grands groupes commerciaux et les petits appareils fournissant des températures en dessous de zéro (pour la réfrigération) utilisent habituellement l'eau pour absorber et l'ammoniac pour réfrigérer. Pour la climatisation, c'est-à-dire la production de températures au-dessus de zéro, on utilise couramment la combinaison eau-bromure de lithium.

Dans tous les cycles à absorption, la chaleur à une température  $T_g$  (la température du générateur) est fournie tandis que la chaleur est extraite à l'évaporateur où le « froid » est produit à une température  $T_e$ . La chaleur rejetée du système vers l'extérieur (hors de l'espace à refroidir) sort d'un condenseur à la température  $T_c$  et d'un absorbeur à la température  $T_a$ .  $T_a$  et  $T_c$  sont à peu près égales (et seront appelées  $T_c$ ); elles sont supérieures de quelques degrés à la température ambiante lorsqu'il s'agit de condenseurs et d'absorbeurs refroidis à l'air (et supérieures de quelques degrés à la température locale prise avec un thermomètre à boule humide lorsqu'il s'agit d'appareils refroidis à l'eau).

L'étude thermodynamique de cycles à absorption fait apparaître deux faits importants, quels que soient le système ou les matières utilisés.<sup>2</sup>

a) La quantité de chaleur produite à l'extrémité chaude sera toujours supérieure à la quantité du

<sup>1</sup> On est parti des hypothèses suivantes : un seul revêtement de verre blanc-eau; capacité d'émission sélective de l'absorbeur 0,12; capacité d'absorption, 0,92; isolement arrière 5 cm; insolateur de large superficie, sans pertes sur les bords; 10 p. 100 de perte par transfert, ombre et poussières etc.; intensité solaire moyenne pendant les heures d'ensoleillement : 200 Btu par heure et pied carré, ou 74 kcals par heure et mètre carré. Le rendement est supposé être celui nécessaire pour une condition d'ébullition, c'est-à-dire que l'ensemble de l'insolateur est approximativement à 50 p. 100 de la température produite (1, 2).

<sup>2</sup> Ces faits s'appliquent aux systèmes à phase unique. Les systèmes à phases multiples peuvent donner des résultats différents : on peut obtenir des coefficients d'utilisation plus forts, les températures de régénérateur étant toutefois considérablement plus élevées. On expérimente actuellement de tels systèmes, mais on ne construit aucun groupe commercial avec système à phases multiples, parce qu'ils sont beaucoup plus compliqués. Avec une température au régénérateur de 180 °C environ pour un système à deux phases et un coefficient d'utilisation deux fois plus élevé que la normale, il est extrêmement douteux qu'on puisse justifier l'emploi pour ce système de la chaleur solaire, à moins que les calories solaires ne soient tellement plus coûteuses que les calories produites par combustibles que l'économie de chaleur ne devienne l'élément principal du coût global.

« froid » produite : dans un système idéal ces deux quantités sont presque égales. Le coefficient d'utilisation (CDU) d'un appareil réfrigérant étant le rapport des calories extraites à l'extrémité froide aux calories de chaleur produites, le CDU est toujours inférieur à l'unité.

b) Le « gain » de température, c'est-à-dire  $T_g - T_c$  est, dans un système idéal, à peu près égal à la « perte » de température, c'est-à-dire  $T_c - T_e$ . Dans la réalité, le gain est toujours un peu plus élevé que la perte. (Des exemples en sont donnés dans le mémoire S/37 où nous constatons que  $T_e = 55^\circ\text{F}$  ( $13^\circ\text{C}$ ) et  $T_c = 85^\circ\text{F}$  ( $29^\circ\text{C}$ ), soit une perte de  $30^\circ\text{F}$  ( $15^\circ\text{C}$ ),  $T_g = 118^\circ\text{F}$  ( $48^\circ\text{C}$ ), c'est-à-dire que le gain est de  $35^\circ\text{F}$  ( $17^\circ\text{C}$ ); si  $T_c = 90^\circ\text{F}$  ( $32,2^\circ\text{C}$ ), la perte est de  $35^\circ\text{F}$  ( $17^\circ\text{C}$ ) et le gain de  $45^\circ\text{F}$  ( $23^\circ\text{C}$ ); si  $T_c = 100^\circ\text{F}$  ( $37^\circ\text{C}$ ), la perte est de  $40^\circ\text{F}$  ( $20^\circ\text{C}$ ) et le gain de  $55^\circ\text{F}$  ( $27^\circ\text{C}$ ).

Ces deux faits ont une importance capitale lorsqu'on étudie le problème du refroidissement par la chaleur solaire. Le premier indique la quantité minimale de chaleur à fournir par l'insolateur pour un effet de réfrigération donné. Si le CDU idéal peut approcher de l'unité, les chiffres réels se situent autour de 0,7 pour les grandes installations industrielles, et tombent à environ 0,4 pour les petits groupes (mémoire S/82).

Le second phénomène fixe la température de fonctionnement du générateur et, par conséquent de l'insolateur. Par exemple, dans des conditions normales de climatisation, la température à l'évaporateur doit être de 4 à 5 °C (40 °F) afin de pouvoir refroidir l'air au moyen d'une petite surface de transfert de chaleur à l'évaporateur. Si la température ambiante en été est, par exemple, de 30 °C (et elle peut facilement être plus élevée), ce qui donne une  $T_c$  d'environ 35 °C, nous voyons que la perte est de  $35 - 5 = 30^\circ\text{C}$ ; le gain sera donc de l'ordre de 40 à 45 °C et la température du générateur doit être de 75° à 80°; l'insolateur sera un peu plus chaud. Et c'est là une température un peu trop élevée pour un insolateur à plaques plates.

Les auteurs du mémoire S/37 se sont rendus compte de cette difficulté et ils situent la température à l'évaporateur à 55 °F (12,8 °C) au lieu de 40 °F (4,4 °C), ce qui nécessite une augmentation de la surface de l'évaporateur, mais abaisse la température du générateur : c'est-à-dire que si  $T_c = 95^\circ\text{F}$  (35 °C) la perte est de 40 °F (20 °C) et le gain de 55 °F (27 °C); et  $T_g = 140^\circ\text{F}$  (60 °C) qui est une température raisonnable pour un insolateur à plaques plates. Nous remarquons tout de suite que comme le gain est un peu plus élevé que la perte, un gain de 1° de  $T_c$  entraîne une hausse de 2 1/2° au générateur. Les auteurs de S/27 ont naturellement utilisé le refroidissement par eau pour ramener la température au condenseur à 95 °F (35 °C), ou même plus bas : si l'on utilisait le refroidissement par air,  $T_c$  monterait bien au-dessus de 100 °F (37,8 °C) en été, ce qui exigerait des températures au générateur et à l'insolateur très supérieures à 140 °F (60 °C). Donc, en utilisant le refroidissement par eau (ce

qui peut être un inconvénient dans certaines régions) et la température la plus élevée possible à l'évaporateur, les auteurs ont pu envisager l'emploi d'insolateurs à plaques plates dans des régions où autrement ils n'auraient pu être utilisés efficacement.

Nous notons tout de suite que le rapport entre le gain de chaleur et la baisse de la température rend pratiquement impossible de faire fonctionner un cycle de réfrigération (température inférieure à zéro) au moyen d'un insolateur à plaques plates. C'est pourquoi les mémoires qui traitent des réfrigérateurs solaires (S/82, S/70, S/109) préconisent tous l'emploi d'insolateurs à foyer pour obtenir des températures inférieures à zéro.

Il est impossible dans le présent rapport d'examiner en détail tous les types de production de froid étudiés, et il convient que le lecteur se réfère aux mémoires originaux. Ainsi qu'on pouvait s'y attendre, chaque système a ses avantages et ses inconvénients. Le système bromure de lithium-eau est probablement le meilleur pour la climatisation, car il a fait ses preuves, mais il ne peut produire des températures inférieures à zéro et est donc inapplicable pour la production de glace et la réfrigération des denrées alimentaires. Le système eau-ammoniac convient dans ce domaine et, lorsqu'il s'agit de grandes installations, son CDU est satisfaisant. Toutefois, dans les petits appareils commerciaux, c'est-à-dire les réfrigérateurs domestiques, le CDU est bien inférieur<sup>3</sup>, et il y a donc lieu de continuer les recherches, compte tenu du fait que dans un appareil solaire ce sont les frais de premier établissement (réfrigérateur plus insolateur) qui doivent être réduits au minimum. C'est pourquoi le Professeur Daniels a commencé des expériences où il utilise la combinaison du thiocyanate de soude comme absorbant et de l'ammoniac comme réfrigérant au lieu d'eau et d'ammoniac. Ce procédé peut présenter l'avantage de réduire les pressions (ce qui permet de réaliser un matériel plus léger); de plus, l'absorbant ne s'évaporant pas, il n'est plus nécessaire de rectifier les quantités comme dans les systèmes eau-ammoniac où l'on doit éviter la séparation de l'eau par distillation.

### *Cycles intermittents et continus*

Les premiers appareils à absorption fonctionnaient en cycle intermittent : le réfrigérant sortait du générateur sous l'effet de la chaleur, et il se condensait; puis il se dilatait dans l'évaporateur et était réabsorbé pour revenir au générateur sous sa forme initiale. Les utilisateurs n'aimaient pas ces cycles intermittents, et l'on a mis au point des cycles continus où la régénération se fait en même temps que les autres processus et où il n'y a pas d'interruption dans l'effet réfrigérateur.

Le rayonnement solaire étant intermittent, il était naturel qu'on envisageât de revenir aux cycles

<sup>3</sup> Pour éviter l'emploi de pompes mécaniques, le système Plattens-Munther utilisé pour les petits appareils ajoute un gaz inerte qui réduit inévitablement le rendement.

à absorption intermittents. Ceux-ci sont très bien décrits dans le mémoire S/82, et le réfrigérateur le plus simple est composé de deux récipients sphériques aux extrémités d'un tuyau de jonction qui contiennent une solution d'absorbant-réfrigérant. Pendant une période de deux heures, une sphère, contenant toute la solution, est chauffée au foyer d'un miroir solaire, et l'ammoniac passe par distillation dans la seconde sphère. Cette sphère est alors placée dans l'armoire froide et l'évaporation de l'ammoniac qui est réabsorbé dans la première sphère (maintenant à la température ambiante) produit l'effet de refroidissement souhaité qui peut durer pendant la plus grande partie des autres 22 heures de la journée. Le CDU est assez faible (environ 0,4) parce qu'on n'utilise pas d'échangeurs pour la récupération de la chaleur; l'appareil est assez lourd à manipuler. Si l'on parvient à améliorer le rendement et à réduire la pression interne et le poids, un tel système pourrait être fort apprécié dans les pays sous-développés, où l'on accepterait la manipulation manuelle, y compris le réglage périodique du miroir solaire pendant la régénération. Il est également probable que l'on pourrait améliorer le miroir, dont le rendement de chauffage est d'environ 40 p. 100.

Les cycles continus sont, bien entendu, plus compliqués et l'un des problèmes qui se posent est la circulation des fluides. Lorsqu'on dispose d'électricité, on utilise de petites pompes, mais là où il n'y a pas d'électricité, le système doit pomper lui-même au moyen d'une thermopompe. Cela n'est pas possible dans tous les appareils, ce qui est un nouvel obstacle à l'utilisation d'appareils à absorption uniquement actionnés par l'énergie solaire.

Nous n'avons traité jusqu'ici que de « cycles fermés », c'est-à-dire de cycles où on n'utilise aucun élément en dehors de la chaleur; ce sont là les cycles indispensables pour la réfrigération. Lorsqu'il s'agit de climatisation où le « réfrigérant » est l'eau, on a parfois recours à des cycles « ouverts », c'est-à-dire que de l'eau est ajoutée ou soustraite à l'atmosphère. Ces systèmes sont souvent beaucoup plus simples que les systèmes fermés, mais le CDU est faible, surtout parce que le processus de régénération nécessite le chauffage d'une grande masse d'air, de l'absorbant et de la vapeur d'eau. Un exemple de ce genre d'appareil est donné dans le mémoire S/88, qui décrit ce qui semble à première vue un moyen très simple de climatiser une habitation : un cycle intermittent ouvert qui utilise une matière absorbante placée à l'intérieur des murs de l'habitation. Mais le CDU est de l'ordre de 0,10 à 0,15, si bien que le volume de chaleur nécessaire au fonctionnement est très élevé.

#### *Refroidissement par injection*

On utilise parfois de la vapeur sous haute pression pour les appareils de climatisation; au moyen d'un injecteur, on provoque une aspiration dans un évaporateur, ce qui produit le refroidissement. En fait, c'est un appareil de refroidissement du type

à compression — le compresseur mécanique étant remplacé par un injecteur. On évite l'usure des systèmes mécaniques.

L'efficacité mécanique de l'injecteur augmente avec la pression de la vapeur, c'est-à-dire avec la température, mais reste bien inférieure à celle des moteurs et pompes traditionnels, et le rendement des appareils de réfrigération à injection ne semble satisfaisant que dans les grandes installations. (Les injecteurs à vapeur ne peuvent être utilisés pour la production de températures inférieures à zéro, et il faudrait donc avoir recours à un injecteur à Fréon pour la réfrigération.)

A cause des températures de vapeur assez élevées qui sont nécessaires pour que le fonctionnement soit satisfaisant, ce système n'a guère retenu l'attention dans les centres de recherche sur l'énergie solaire, bien que Ward (4) estime qu'un système satisfaisant, avec 180 °F (82,2 °C) à l'insolateur, peut être mis au point pour obtenir une température de 60 °F (15,6 °C) à l'évaporateur, avec un coefficient général d'utilisation, notamment à l'insolateur, de 0,3. C'est là une direction intéressante où valent de nouvelles recherches.

#### **Aspects économiques**

La climatisation avec des appareils classiques est assez coûteuse, et rien ne permet de croire que la climatisation par énergie solaire entraînera beaucoup moins de frais. La réfrigération domestique étant un petit poste de dépenses, le facteur coût est moins important.

On a fait observer que la production de froid par énergie solaire est semblable aux autres formes de production de froid par la chaleur, si ce n'est que la source de chaleur est un insolateur et que l'appareil de réfrigération aura en général un coefficient d'utilisation plus faible et coûtera peut-être plus cher qu'un appareil fonctionnant avec du combustible.

Si donc nous partons de l'hypothèse que, grâce à des recherches plus approfondies, l'appareil de production de froid au moyen de l'énergie solaire peut être fabriqué au même coût et aura le même CDU qu'un appareil classique, l'économie comparative de la production de froid se réduit à une comparaison du coût des calories solaires et du coût des calories produites à partir de combustibles.

Si  $Q_s$  = le rayonnement solaire total frappant 1 m<sup>2</sup> de l'insolateur pendant l'été (kcalcs par m<sup>2</sup> par saison),

$E_c$  = le rendement de l'insolateur,

$C$  = le coût par m<sup>2</sup> de l'insolateur en dollars E.-U.,

$J_c$  = les frais de capitaux par an (amortissement plus intérêt),

<sup>4</sup> Les injecteurs sont utilisés dans les centrales où la vapeur qui s'échappe entre dans le processus : la production mécanique est faible mais le rendement thermique est pratiquement de 100 p. 100; seule de la « température » est perdue.

le coût annuel de  $P_c$  de  $10^6$  calories de chaleur solaire s'établit ainsi :

$$P_c = \frac{C J_c}{Q_s E_c} \times 10^6 \text{ (en dollars)}$$

Si nous supposons qu'un combustible d'une valeur calorifique de  $H$  kcals par tonne, qui coûte  $K$  dollars la tonne, est brûlé dans une chaudière à rendement  $E_f$ , le coût  $P_f$  de  $10^6$  calories de combustible est :

$$P_f = \frac{K}{H E_f} \times 10^6$$

La chaleur solaire est donc égale à la chaleur produite par le combustible lorsque  $P_f = P_c$ <sup>5</sup>, c'est-à-dire lorsque le coût du combustible est :

$$K = \frac{H E C J_c}{Q_s}$$

L'introduction de certaines valeurs représentatives permet de se rendre compte des chances de viabilité économique.

Si  $H = 10^7$  kcals/tonne.

$E_c = 0,5$ . Chiffre plutôt élevé.

$E_f = 0,7$ . Ceci est faible pour de gros appareils mais élevé pour les petits.

$C = 20$  dollars le  $m^2$ . Ce coût est moins élevé que celui des insolateurs d'aujourd'hui, mais on peut considérer que c'est un prix qu'il est raisonnable d'espérer atteindre.

$J_c = 0,103$ . Dans l'hypothèse d'une longévité de 15 ans, d'un taux d'intérêt de 6 p. cent et d'un fonds d'amortissement (voir mémoire S/54).

$Q_s = 10^6$  kcals/ $m^2$ /saison. Un climat ensoleillé donnera près de deux fois plus pour l'année entière.

Alors  $K = 28,8$  dollars la tonne.

Ce prix est à peu près le double du coût du mazout importé livré à quai. Mais de nombreux petits consommateurs dans des régions isolées paient jusqu'à trois fois ce prix pour le mazout ou son équivalent calorifique qui leur est livré.

Cet échantillon de valeurs représentatives est optimiste. Les insolateurs à plaques plates coûtent aujourd'hui environ 60 dollars le  $m^2$  selon Sheridan (mémoire S/39, type B), coût qui peut être ramené jusqu'à environ 46 dollars lorsque l'insolateur est construit en tant que partie du toit. Ashar et Reti (mémoire S/37) estiment à 24 dollars le  $m^2$  le prix d'insolateurs à plaques plates construits en Inde. Les insolateurs à foyer coûtent actuellement plus cher que les insolateurs à plaques plates, mais on peut espérer que l'emploi des plastiques permettra d'obtenir un prix de 20 dollars le  $m^2$ . Dans ce cas, une longévité de 15 ans n'est pas probable et il est plus raisonnable de prévoir une durée de six ans,

<sup>5</sup> On a supposé arbitrairement que les frais d'entretien sont les mêmes dans les deux cas.

et ceci fait que  $J_c = 0,203$ , soit près de deux fois la valeur que nous avons supposée.

La valeur de  $Q_s$  est fonction du climat local et en particulier de la longueur de la saison où la climatisation est nécessaire. Dans le cas d'un réfrigérateur solaire intermittent qui n'utilise que deux heures d'ensoleillement par jour,  $Q_s$  ne serait que  $0,6 \times 10^6$  kcals/ $m^2$ , même pour une utilisation de 365 jours par an par temps clair.

Dans l'ensemble, néanmoins, la situation actuelle est encourageante. Partout où le combustible est rare ou cher, l'insolateur solaire peut concurrencer les autres sources de chaleur pour la production de calories à basse température; dans les régions très développées où les combustibles sont bon marché, les calories solaires ne peuvent actuellement soutenir la concurrence.

### Climatisation des habitations

Le Secrétariat de la Conférence a décidé d'accepter, dans cette section, les mémoires qui traitent de la climatisation des immeubles, même si les systèmes proposés ne fonctionnent pas au moyen de l'énergie solaire. Il peut y avoir des circonstances qui permettent la climatisation d'une manière moins coûteuse et plus simple qu'au moyen d'appareils fonctionnant à la chaleur (combustible ou soleil); de plus, il est logique de tirer tout le parti possible des facteurs climatiques. C'est ainsi par exemple que les climats chauds et ensoleillés dans le désert ont des nuits froides et des ciels très clairs. Les nuits froides peuvent être utilisées pour climatiser l'habitation en « accumulant » le froid de la nuit; les ciels clairs peuvent servir à climatiser l'habitation par rayonnement du toit et des murs vers le ciel « froid ». Lorsque le climat est chaud et sec, le refroidissement par évaporation ramène, en général, la température à un niveau supportable, et si l'accroissement de l'humidité est gênante, l'air frais et humide peut être utilisé pour refroidir l'air sec à travers la surface d'un échangeur de chaleur. Il faut noter bien entendu que les systèmes de refroidissement par évaporation peuvent être coûteux, à cause de la quantité d'eau utilisée.

Enfin, il incombe à l'architecte de faire le plan de l'habitation de manière à obtenir le meilleur climat à l'intérieur avec le minimum d'appareils d'appoint.

Les savants français, qui ont à résoudre ces problèmes au Sahara, ont beaucoup travaillé dans ce domaine et ils ont présenté trois mémoires (S/76, S/64, S/111). L'auteur du mémoire S/39, venu d'Australie, attache beaucoup d'attention au plan de la maison et il étudie un appareil à absorption solaire pour les régions qui sont trop humides pour que l'on puisse utiliser le refroidissement par évaporation.

L'auteur du mémoire S/111 donne un exposé utile de la manière dont on peut utiliser le rayonnement de nuit pour refroidir un toit et faire des-

cedre l'air froid dans l'habitation, tandis que des vitrages peuvent servir soit au chauffage (par rayonnement solaire incident), soit à la climatisation par rayonnement. On peut également exploiter la sélectivité de surfaces spéciales : les corps sélectifs « chauds » sont ceux qui absorbent les rayons du soleil mais émettent peu de chaleur, et les corps sélectifs « froids » sont ceux qui, de couleur blanche, absorbent peu le rayonnement du soleil mais sont fort proches des corps noirs émetteurs thermiques.

Le mémoire S/76 traite du refroidissement par évaporation dans un climat saharien, mais l'air froid humidifié passe à l'intérieur des murs creux de l'habitation et climatise donc l'intérieur de la maison sans élever le degré hygrométrique.

Les auteurs soulignent avec raison que les murs doivent dans ce cas particulier avoir une faible inertie thermique par opposition au système plus classique, exposé dans le mémoire S/39, où l'inertie thermique des murs doit être élevée pour égaliser les variations de température entre le jour et la nuit.

Certains auteurs sont d'avis que le mouvement de l'air peut être provoqué par l'énergie solaire qui, frappant les murs et le toit noircis, produisent un effet de tirage, encore qu'il soit admis que si l'on utilise des filtres d'air, il faut employer un ventilateur. (Dans le mémoire S/88, il est indiqué que l'effet de tirage solaire était très faible dans une autre maison expérimentale).

Une analyse plus approfondie prouvera peut-être que, dans les régions qui sont alimentées en électricité, la cheminée solaire peut être un procédé coûteux pour déplacer l'air, par comparaison avec un petit ventilateur.

Le mémoire S/64 présente un cas spécial de climatisation : il s'agit d'une serre où des bacs d'eau placés sous la toiture permettent la distillation par le soleil et le contrôle du micro-climat à l'intérieur de la serre. Cette communication devrait présenter beaucoup d'intérêt pour les agriculteurs qui essaient de faire certaines cultures spéciales dans un climat trop ensoleillé.

Les analyses économiques de ces divers systèmes ne figurent pas dans les communications, et il reste encore beaucoup à faire dans ce domaine pour déterminer s'ils sont techniquement réalisables et s'ils se justifient du point de vue économique.

### Conclusions

La réfrigération solaire en vue de préserver les aliments et de climatiser les habitations offre beaucoup d'intérêt en raison de la grande utilité que présente la réfrigération dans les climats ensoleillés et de la corrélation qui existe entre la charge de réfrigération et l'intensité solaire.

Parmi les modèles d'appareils de réfrigération utilisant la chaleur, les plus satisfaisants sont les appareils à cycle d'absorption fermé qui doivent être des modèles classiques adaptés aux sources de

chaleur solaire, et qui doivent notamment capter la température la plus basse possible. Pour la climatisation, la température captée peut être suffisamment basse (60 °C) pour que l'on utilise les insolateurs à plaques plates; les appareils réfrigérants pour la conservation des aliments ou la production de glace exigent des températures captées plus élevées et il faut donc avoir recours à un modèle d'insolateur à foyer qui, abstraction faite de coût, nécessite des manipulations. Les appareils à cycle d'absorption ouvert exigent un apport de calories plus élevé et ne présentent pas d'intérêt, encore que leur prix initial (non compris les insolateurs) puisse être faible.

Beaucoup d'études doivent encore être effectuées pour déterminer quels sont les meilleurs cycles d'absorption pour utiliser la chaleur solaire, mais des progrès sensibles ont déjà été faits.

La réfrigération au moyen d'un injecteur peut remplacer l'appareil à absorption, et ce système est peut-être moins coûteux et plus simple à construire, mais la consommation de chaleur sera sans doute forte (ce qui nécessitera l'emploi d'insolateurs de grandes dimensions), à moins que l'injecteur ne soit très bien conçu et que la température captée ne reste élevée. Il faut procéder à des études et à des expériences minutieuses afin de déterminer si ce système relativement peu connu peut valablement remplacer les systèmes à absorption.

On peut supposer que les appareils réfrigérants adaptés à l'emploi d'insolateurs auront avec le temps un rendement à peu près aussi élevé que des appareils analogues utilisant les combustibles; on constate pour l'instant que les systèmes utilisant l'énergie solaire ne peuvent concurrencer les systèmes à combustibles dans les régions où les coûts des combustibles correspondent aux prix mondiaux normaux, mais qu'ils peuvent présenter de l'intérêt dans les régions écartées où le prix des combustibles est plusieurs fois supérieur au prix mondial<sup>6</sup>. Dans ces conditions, le temps n'est peut-être pas loin où la climatisation par énergie solaire sera réalisable dans la pratique.

Un nouveau procédé qui semble prometteur, et particulièrement adapté aux besoins de collectivités primitives dans les régions chaudes, est le réfrigérateur domestique à cycle à absorption intermittent régénéré par un miroir solaire. Pour l'améliorer il faut diminuer la pression, ce qui permettra une construction plus légère (et réduira les dangers d'éclatement dus au surchauffage); il faut aussi augmenter le CDU et mettre au point un miroir de régénération plus efficace. (Ce miroir peut être utilisé à d'autres fins, telles que la cuisine par chaleur

<sup>6</sup> Certains auteurs sont d'avis que les pays sous-développés auraient intérêt à investir leurs capitaux non pas dans la construction d'appareils solaires, mais dans celle de bonnes routes et de chemins de fer afin d'abaisser le coût du transport des combustibles. Cela est peut-être vrai dans le cas des grandes installations solaires, mais l'argument est moins valable lorsqu'il s'agit d'un grand nombre de petits appareils solaires dispersés, tels que les réfrigérateurs et les appareils de climatisation.

solaire, quand on ne l'emploie pas pour la régénération).

Il ne faut pas négliger certains autres procédés de climatisation des habitations qui peuvent servir d'appoint à la climatisation solaire, ou même être employés seuls. Citons notamment la climatisation par évaporation dans les climats chauds et secs (à condition que l'approvisionnement en eau soit suffisant) et la climatisation par rayonnement nocturne dans les régions de ciel clair, mais il importe d'appliquer de bons principes dans la conception même des habitations.

### Sujets de discussion proposés

1. Différence entre le refroidissement par énergie solaire et le refroidissement classique, en l'absence d'énergie électrique.

2. Rôle possible de la réfrigération des denrées alimentaires dans les pays sous-développés, et notamment étude des réfrigérateurs de petites dimensions et/ou de grandes dimensions fonctionnant par énergie solaire, de la production de glace dans les appareils solaires et des coûts économiquement

admissibles. Examen de l'intérêt que pourrait présenter éventuellement la centralisation de l'emmagasinage frigorifique des denrées alimentaires dans les villages, par contraste avec l'emmagasinage frigorifique domestique chez les particuliers.

3. Nécessité du froid pour le bien-être de l'homme et son effet sur la productivité de l'homme examinés en corrélation avec le degré des variations de température et d'humidité qui peut être réalisable au moyen des appareils solaires et qui pourrait être utilisé sur une base intermittente.

4. Coopération entre les spécialistes de l'énergie solaire et les architectes en vue de la construction de maisons selon des plans qui contribueraient à une amélioration du refroidissement grâce à l'énergie solaire.

5. L'emploi de la climatisation pour faciliter la croissance végétale grâce à la fois à la production d'eau douce et au contrôle de l'humidité dans les zones arides.

6. Degré de complexité des appareils réfrigérateurs à énergie solaire que l'on peut tolérer dans les pays sous-développés.

### Références

La liste de références suit immédiatement le texte anglais original.

## USE OF SOLAR ENERGY FOR COOLING PURPOSES

### *Rapporteur's summation*

In summarizing the discussion of agenda item III.D at the Conference some preliminary comments on the use of solar energy — and power — are in order.

We need have no illusions. Solar energy will not solve all problems, not even most of them, but only some, even with new breakthroughs.

The fundamental limitations of the amount of sunshine in a given place and of thermodynamics are unaltered by any technical breakthrough; the regions of viable applicability are merely increased. It is necessary to consider each area separately: to consider its problems and then see if solar energy can help.

As an example: one delegate spoke of the need of solar energy for air conditioning in industries in hot climates in order to increase productivity. Another delegate pointed out that in such cases there was competition from electricity, and solar energy was therefore not practical. Yet another said that there was electricity in the factory, but not enough, and the authorities would not agree to its use for such "luxuries" as air conditioning. It appeared as though these three delegates were referring to three different places. Thus it is extremely dangerous to generalize; though this is exactly what a summation inevitably does.

The use of solar energy for cooling purposes may be divided into (a) cooling and refrigeration for the preservation of food (including ice-making); and (b) the cooling of dwellings (air conditioning).

### *Refrigeration*

Research to date has shown that in the use of solar energy, more progress was recorded with intermittent machines than with continuous operation machines; this is to be expected from the intermittent nature of sunshine. One matches the device to the solar cycle.

There were reasonable prospects for producing a very simple household device for cooling a food container which required some manual manipulation (Paper S/82). More research was needed, however, to reduce internal pressures and thus lower the weight and cost of the device.

Another successful solar device manufactured ice at a price competitive with ice delivered from a large distant central ice-making plant. This is an example of a general principle in solar energy utilization: because solar energy is distributed free whereas other forms of energy involve distribution costs, solar

energy should in general be harnessed at the point of use.

The question arose as to which was more important: domestic units or village units. The general feeling was that, at least in the initial stages, we should concentrate on village or community units (although one delegate pointed out that in his area dwellings were so spread out that village units would not be very practical).

The reasons in favour of community units are numerous and rather convincing, being technical, economic, social and anthropological.

(a) A large unit is usually more efficient and hence relatively cheaper;

(b) It is easier to maintain a technical device at the communal level;

(c) A community often has money to buy a machine whereas the individual household does not;

(d) Refrigeration, unlike cooking, is quite new, and the introduction of a completely new device, not an alternative device to that which the people are accustomed, meets with great resistance.

There is, in many cases, a strong prejudice against eating any food which has been kept more than one day. The hygienic reasons for this prejudice are obvious; the food is said to be "dead" (a bacteriologist would say the opposite!). To persuade anyone that a new device that he does not understand will allow him to keep his food for long periods requires a long, difficult educational process.

A farmer or trader, however, is apt to learn much faster. One delegate pointed out that in his country there was an over-production of food; what was not sold on market day was thrown away. The wastage was so high that food actually had to be imported. Another delegate referred to a common commodity with price variations of twelve to one, simply because there were no food preservation facilities.

It was further pointed out that many new States have central governments with policies designed to strengthen local agriculture, and these governments would support the purchase of refrigeration equipment — particularly solar equipment, if practical — for village, farm and market use.

One delegate stated that further development was needed; this could not be accomplished in the new countries, but if a manufacturer from an economically advanced country were able to supply the proper equipment, he would find a market.



*Air conditioning*

With respect to the question of air conditioning (i.e., cooling of dwellings), it was pointed out that air conditioning is never cheap, and there is no reason to believe that solar air conditioning will be cheap.

Thus there was almost unanimous agreement that we should not interest ourselves, at this stage, in air conditioning of dwellings in under-developed countries. It was further pointed out that in many cases the climate in areas under review was not as bad as generally believed (with of course many exceptions), and that what was needed was to pay much more attention to the design of the dwelling so that no mechanical aids (or only the very simplest) would be needed. We could often learn a great deal from the building traditions of people who had lived in a region a long time; the addition of a little knowledge of the physics of heat transfer would be helpful.

The cooling or air conditioning of public buildings, schools, hospitals and factories, however, was quite another matter. In many such cases, of course, electricity or fuel for absorption machines would be available and would be competitive with solar cooling. In fact, no examples or papers were submitted at the Conference on the solar cooling of such public dwellings, but it seems that it would be practical

(though not cheap) in areas where other fuels were expensive.

It may be noted that much of the research regarding solar air conditioning — heating and cooling — has been done in economically advanced countries, where the psychology of the researcher has been attuned to conditions in such countries.

*Conclusions*

There is a need for refrigeration for food preservation, and the emphasis should be on village or communal units first.

Air conditioning should be limited to public buildings; more attention should be paid to simple methods of improving individual dwellings by intelligent construction.

What of the future? I am quite optimistic in this respect, if more research is done in economically advanced countries. A simple intermittent household unit should be quite feasible; larger intermittent units for communal use seem practical and are sufficiently developed to permit their use by industrial concerns.

The approximate synchronization of cooling demand and solar radiation supply is obvious. This whole area has a future if proper care is paid to exactly what is required, and where.

# EMPLOI DE L'ÉNERGIE SOLAIRE POUR LA PRODUCTION DE FROID

## Résumé du rapporteur

Il y a lieu, en résumant l'examen du point III. D de l'ordre du jour de la Conférence, de faire quelques observations préliminaires sur l'emploi de l'énergie — et de la puissance — solaire.

Ne nous faisons pas d'illusion. L'énergie solaire ne résoudra pas tous les problèmes, ni même la plupart; elle ne peut en résoudre que quelques-uns, même si l'on fait de nouvelles découvertes. En effet, aucun progrès technique ne pourra prolonger la durée de l'ensoleillement en un lieu donné, qui est soumise à des limitations fondamentales, ou altérer les lois de la thermodynamique; tout juste pourra-t-il élargir l'éventail des régions où les applications pratiques de l'énergie solaire sont possibles et rentables. Il faut donc examiner, d'une part, les problèmes particuliers à chaque région et, d'autre part, la question de savoir si l'emploi de l'énergie solaire peut y être utile.

C'est ainsi qu'un participant a déclaré qu'il fallait capter l'énergie solaire en vue de la climatisation des entreprises industrielles des pays chauds afin d'accroître la productivité. Un autre a fait observer qu'en ce domaine l'énergie solaire se heurtait à la concurrence de l'électricité, et qu'elle n'était donc pas d'un emploi pratique. Un troisième a ajouté que les usines disposaient bien d'énergie électrique, mais pas en quantité suffisante, et que les pouvoirs publics n'accepteraient pas de l'utiliser à des fins aussi « superflues » que la climatisation. On aurait dit que ces trois participants parlaient de trois endroits différents. Il est donc extrêmement dangereux de généraliser; or, c'est exactement ce qui se passe dans des conclusions.

En ce qui concerne la production de froid, l'énergie solaire peut servir : a) à refroidir et à réfrigérer les aliments en vue de leur conservation (et à fabriquer de la glace); b) à refroidir les locaux (climatisation).

### Réfrigération

Il ressort des recherches effectuées que, dans ce domaine, les progrès ont été plus grands pour les machines intermittentes que pour les machines à fonctionnement continu, ce qui était prévisible, étant donné le caractère intermittent de l'ensoleillement. Le système est adapté au cycle solaire.

On peut raisonnablement espérer mettre au point un appareil ménager familial très simple capable de refroidir un récipient contenant des aliments et ne demandant qu'un minimum de manipulations (mémoire S/82). Mais il faut poursuivre les recherches

afin de diminuer les pressions internes et d'abaisser ainsi le poids et le coût de l'appareil.

Un autre appareil solaire fonctionnant bien fabriqué de la glace à un prix qui permet de concurrencer la glace livrée par une importante usine centrale assez éloignée. C'est l'illustration d'un principe général applicable en matière d'utilisation de l'énergie solaire : cette dernière étant gratuite, alors que d'autres formes d'énergie impliquent des coûts de distribution, elle doit, d'une manière générale, être exploitée au point d'utilisation.

La grande question qui s'est posée est de savoir s'il était préférable d'avoir des installations domestiques ou des installations de village. De l'avis général, il faut, du moins au stade initial, faire porter les efforts principalement sur les installations de village ou les installations collectives (encore qu'un représentant ait fait observer que, dans la région d'où il venait, les logements étaient répartis sur une superficie telle que des installations de village ne seraient pas très commodes).

Les raisons qui militent en faveur des installations collectives sont toutefois nombreuses et assez convaincantes, car elles sont d'ordre technique, économique, social et anthropologique :

a) Une grande installation est généralement plus efficace qu'une petite et, par conséquent, relativement plus économique;

b) L'entretien d'une installation technique est plus facile à l'échelon communal;

c) Une collectivité a souvent — ce que n'a pas toujours le propriétaire d'une habitation — les moyens d'acheter une installation;

d) La réfrigération, à l'inverse de la cuisson, est un procédé tout à fait nouveau, et la présentation d'un appareil entièrement nouveau, qui ne soit pas un appareil qu'on utilise en remplacement d'un autre auquel on est habitué, se heurte à une forte résistance.

Il existe souvent un fort préjugé contre l'absorption d'aliments qui ont été conservés plus d'un jour. Les raisons hygiéniques de ce préjugé sont évidentes : les aliments sont dits « morts » (un bactériologue dirait le contraire!). Persuader une personne qu'un appareil nouveau dont elle ne comprend pas le fonctionnement lui permettra de conserver ses aliments pendant longtemps requiert une éducation longue et difficile.

Un cultivateur ou un commerçant, toutefois, devrait apprendre bien plus rapidement. Un participant a fait observer que dans son pays, où il y a surproduction de denrées alimentaires, les produits

qui ne pouvaient pas être vendus le jour du marché étaient jetés, et que le gaspillage était tel qu'il fallait même importer des denrées. Un autre participant a signalé le cas d'un produit de base commun dont le prix variait dans la proportion de 12 à 1 simplement parce qu'il n'existait pas d'installation de conservation.

On a également fait observer que nombre de jeunes États s'efforcent de renforcer leur agriculture; leurs gouvernements prendraient à leur charge l'achat de matériel de réfrigération — en particulier de matériel de réfrigération solaire — commode pour les villages, les fermes et les marchés.

Un participant a dit que de nouveaux progrès étaient nécessaires; ceux-ci ne peuvent pas être accomplis dans les jeunes États, mais tout constructeur d'un pays avancé capable de fournir le matériel approprié trouvera ainsi des débouchés.

#### *Climatisation*

On a fait observer au sujet de la climatisation (c'est-à-dire du refroidissement des locaux) qu'elle n'est jamais bon marché et il n'y a aucune raison de penser que l'emploi de l'énergie solaire à cette fin sera peu onéreux.

Les participants ont donc été presque unanimes à dire qu'il ne faut pas se préoccuper, au stade actuel, de la climatisation des locaux dans les pays sous-développés. Ils ont également fait observer que bien souvent le climat de ces régions n'est pas aussi mauvais qu'on le pense généralement (il y a, bien entendu, de nombreuses exceptions), et qu'il faut s'attacher plutôt à construire des logements où aucun appareil (ou seulement les appareils les plus simples) ne serait nécessaire. On peut parfois s'inspirer largement des techniques traditionnelles de construction des populations qui ont longtemps vécu dans une région donnée; il serait utile d'avoir également quelques connaissances de la physique du transfert de la chaleur.

Le refroidissement ou la climatisation des bâtiments publics, écoles, hôpitaux et usines, cependant, est

une toute autre question. Dans bien des cas en effet, on disposerait d'appareils fonctionnant par absorption, consommant de l'électricité ou un combustible quelconque, qui entreraient en compétition avec les appareils de climatisation utilisant l'énergie solaire. En fait, aucun exemple ou aucun mémoire sur la climatisation solaire des bâtiments publics n'a été présenté à la Conférence, mais il semble que ce procédé aurait des avantages (à défaut d'être bon marché) dans les régions où les combustibles sont onéreux.

On peut noter que la plupart des recherches relatives à la climatisation et au chauffage solaires ont été entreprises dans les pays avancés où la psychologie des chercheurs est fonction des conditions existantes.

#### *Conclusions*

La conservation des aliments par réfrigération est une nécessité, et il convient de considérer en premier lieu les installations de village ou les installations collectives.

La climatisation, quant à elle, doit être limitée aux bâtiments publics; il faut se préoccuper davantage de rechercher des méthodes simples visant à améliorer les logements particuliers au moyen de plans bien conçus.

Pour l'avenir, je suis très optimiste à condition que les recherches se poursuivent dans les pays avancés. Une installation familiale intermittente simple doit être tout à fait réalisable; des installations collectives intermittentes, plus importantes, semblent commodes, et leur mise au point est suffisamment avancée pour en permettre l'utilisation dans les entreprises industrielles.

La synchronisation approximative de la demande de climatisation et de la quantité de rayonnement solaire disponible est évidente. C'est là tout un domaine qui a beaucoup d'avenir si l'on s'attache à faire exactement ce qu'il faut dans les régions où un tel effort s'impose.

## COOLING WITH SOLAR ENERGY

R. Chung and J. A. Duffie \*

The application of solar energy to refrigeration or air cooling is an appropriate combination of energy source and energy utilization, as there is frequently a direct relationship of high ambient temperatures to high incident solar radiations. Absorption type cooling or refrigerating units appear, at the present state of development, to be more suited to solar operation than other types of machines. The Solar Energy Laboratory of the University of Wisconsin has carried on studies pertaining to solar operation of small capacity intermittent absorption refrigerators and continuous absorption air coolers.

For convenience of discussion, the over-all performance of solar operated equipment may be expressed by a term  $E$  defined as the ratio of cooling obtained to solar radiation incident upon the collector. Expressing the performance of the two components of the system separately is also convenient: for the solar heat exchanger let  $\xi$  be defined as the ratio of useful energy delivered to the solar radiation incident upon the exchanger, and let  $\eta$  be the ratio of cooling obtained to the energy input (or output of the solar heat exchanger).  $E$ , hence, is the product of  $\xi$  and  $\eta$ . The merit of a piece of solar operated equipment, from the standpoint of energy utilization, does not necessarily depend upon most efficient operation of each component but upon the product of these ratios. The most economical provision of cooling depends on the costs of obtaining acceptable ratios.

## ABSORPTION SYSTEMS

Absorption coolers may be broadly classified as intermittent or continuous. The simplest intermittent cooler is the domestic portable food cooler, such as the American "Icyball" and the French "La Frigor", as schematically shown in figure 1. Detailed studies of several models, differing in refrigerant-absorbent combination and in physical design, have been carried out (1) and some of the results from these studies pertaining to solar operation will be summarized below. Intermittent systems have also been studied by Farber (2) and Chinnappa (3). The  $E$  for these units is low, in the range of 0.1 to 0.2. Also, they require manual manipulation, physically removing the entire cooling unit for regeneration. However, these units are simple in construction, rugged, and have no moving parts. They are suitable in areas where little or no power is available and maintenance requirement should be at a minimum.

Manual manipulation can be considerably reduced

and the absorption unit permanently mounted if the dual functions of the condenser-evaporator were separated. This is known as the open cycle, when the condenser is mounted outside the refrigerated space in such manner that the refrigerant can flow by gravity into the evaporator after regeneration is completed. The manipulation involved will then be in directing the proper flow of fluids before and after regeneration. The performance of these units is substantially the same as the simpler ones. The efficiency of the intermittent machines can be improved through recovery of the sensible heat from the hot absorbent during regeneration. Such schemes as dual units with common condenser and evaporator (4), or the system of Trombadori and Foex (5), have provisions for heat exchange.

Continuous absorption cooling could be operated with solar energy in conjunction with either a flat plate or a focusing solar exchanger. Such systems are better suited to air-conditioning applications, where evaporator temperatures can be substantially higher than in food refrigerators. A design study (6) indicated over-all performance ratios,  $E$ , of about 0.25 for an air conditioning system using a flat-plate solar heat exchanger which is also suitable for winter-time space heating. Developmental study on this design is being carried out using the refrigerant-absorbent combination Freon-21 and tetraethylene glycol dimethyl ether.

## MECHANICAL SYSTEMS AND OTHER METHODS

Cooling may be accomplished with solar energy by first converting radiation into mechanical energy

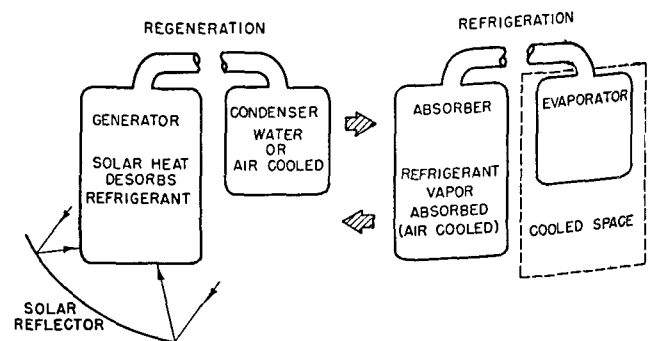


Figure 1. Diagram of a simple intermittent cooler. Each of the two vessels has dual functions: during regeneration as shown on the left, generator-absorber acts as generator and condenser; during refrigeration as shown on right, the generator-absorber acts as absorber and the condenser-evaporator acts as evaporator.

\* University of Wisconsin, Madison, Wisconsin.

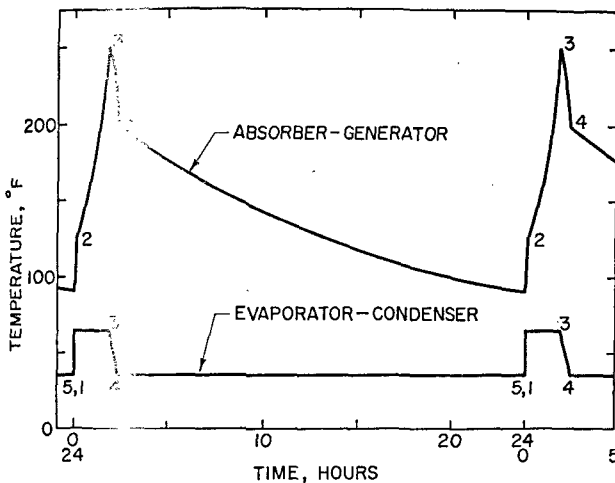


Figure 2. Ideal intermittent cooler cycle

and then operating a compression-type cooler with the converted energy. The conversion of energy from solar to mechanical encounters serious limitations. The coefficient of performance of conventional compression units are in the range of 4.0 or better. As  $\bar{E}$  for intermittent absorption units is about 0.2, then a conversion of 5 per cent of incident radiation to mechanical energy would yield the same over-all performance ratio. This is as yet difficult in the small sizes required for ordinary coolers.

In areas of high relative humidity, dehumidification systems such as that studied by L6f can be used (7). Other possible methods are: dehumidification followed by adiabatic humidification as the

$$\eta = \frac{\text{heat absorbed by refrigerant during refrigeration}}{\text{heat absorbed by generator contents during regeneration}}$$

This ratio is not a point function and does depend upon the path of the cycle and the designated operating conditions. Adopting an ideal cycle as a standard and calculating an ideal cooling ratio,  $\eta_i$ , based on this cycle facilitates comparison of various systems. Such an approach has been followed by Williams *et al.* (1), and the ideal cycle chosen closely approximates an actual one. Figure 2 presents the ideal cycle and figure 3 presents an actual cycle. Referring to figure 2, the cycle is briefly described as follows: heat is added to the generator from 1 to 2 (numbers correspond to those on the figure) at which point the solution has been brought to its boiling point. Addition of more heat from 2 to 3 vaporizes the refrigerant and increases the temperature of the generator contents while the condensing pressure remains constant. When heating is stopped at 3, the generator now begins to function as an absorber and is chilled quickly to initiate cooling in the evaporator. From 3 to 4, the refrigerant in the evaporator cools itself down to the operating temperature without removing heat from the surroundings. From 4 to 5, the evaporator removes heat at a constant temperature and the absorber cools gradually, losing sensible heat accumulated during regeneration and the heat of absorption of the refrigerant. At 5, the

Lizenia machine or as proposed by Dannies (8), air expansion engine as proposed by Heywood (9), nocturnal radiators as studied by Bliss (10) and others, and vaporization of the refrigerant by jet ejectors.

### Intermittent absorption coolers

#### SELECTION OF ABSORBENT-REFRIGERANT SYSTEM

The selection of absorbent-refrigerant combinations involves simultaneous considerations of many factors. Availability and cost are important. Certain physical and thermodynamic properties are desirable. Qualitatively, some of these are: low volatility of the absorbent, to minimize fractionation requirements; vapor pressure of refrigerant not excessively high to avoid constructional difficulties inherent with the relatively large vessels of the intermittent coolers and not excessively low to hinder mass transfer; low heat capacity of the absorbent to minimize irrecoverable sensible heat losses; temperature coefficient of solubility such that the absorbing capacity is high at absorber temperature and low at generator temperature; viscosities, thermal conductivities, and diffusivities favorable for mass and heat transfer.

#### ABSORPTION COOLING RATIO OF INTERMITTENT UNITS

The performance of potentially useful systems expressed as  $\eta$  can be evaluated from the thermodynamic properties of the systems. For absorption systems  $\eta$  is defined as

refrigerant ceases to vaporize at the operating temperatures of the evaporator and absorber. (This description is more general than the original presentation of the ideal cycle (1) but is not at variance with it. In cases where the absorbent can be considered non-volatile, both descriptions of the ideal cycle

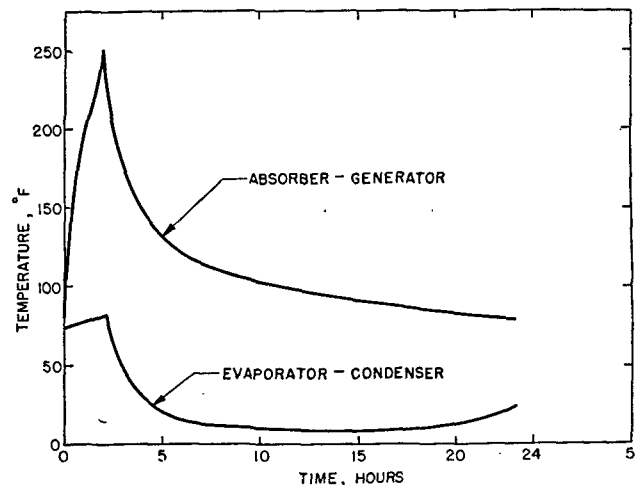


Figure 3. An experimental intermittent cooler cycle for an ammonia-water system

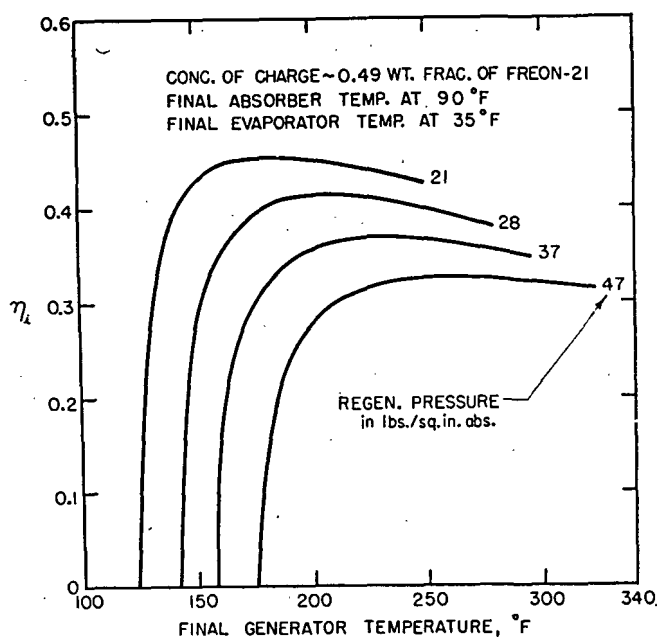


Figure 4. Ideal cooling ratios for the system Freon-21-tetraethylene glycol dimethyl ether. Generator temperature at start of regeneration is 90°F

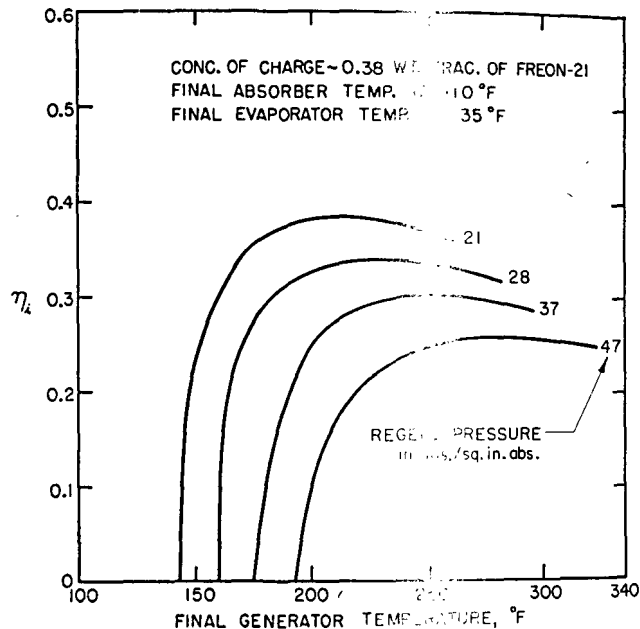


Figure 5. Ideal cooling ratios for the system Freon-21-tetraethylene glycol dimethyl ether. Generator temperature at start of regeneration is 110°F

become identical.) Throughout the cycle, mixing in the absorber-generator is assumed to be complete, vapor is assumed to be in equilibrium with the liquid with which it is in contact, and the total pressure of the whole system is assumed to be constant at the saturation pressure of the condensing vapor during generation and of the vaporizing refrigerant during refrigeration.

Based on this ideal cycle, then  $\eta_i$  can be calculated for various refrigerant-absorbent combinations with different operating parameters. Figure 4 and figure 5 are sets of curves of  $\eta_i$  for the system Freon 21-tetraethylene glycol dimethyl ether; figure 6 and figure 7 are sets of curves for the system ammonia-water. The difference in the shape of curves for the two systems is due to the fact that glycol-ether is non-volatile while significant amounts of water are vaporized along with the ammonia during regeneration. These sets of  $\eta_i$  curves were not calculated at the same operating parameters for both systems and they should not be used for direct comparison. The greatest difference is in the evaporator temperature, that of the Freon 21-glycol ether system is set at 35°F (appropriate for short-time food preservation), and that for the ammonia-water system is set at 25°F (for ice production). As the values of  $\eta_i$  decrease

with decrease in evaporator temperature, these curves as presented do illustrate the ideal ratios of both systems are in the same range. Under approximately the same set of operating conditions, e.g., evaporator temperature at 40°F, final absorber temperature at 100°F, final regeneration temperature at 250°, and condensing temperature in the vicinity of 80°F, the  $\eta_i$  for ammonia-water is 0.37 and  $\eta_i$  for Freon-glycol ether is 0.36.

For systems with volatile absorbent such as the ammonia-water system, provision for fractionation should be considered. Figure 8 illustrates, for the system ammonia-water, for the conditions noted in the caption, the effect on  $\eta_i$  as increasing fraction of the vapor leaving the generator is differentially condensed. In this example, a maximum is reached when 9.5 per cent of the vapor is differentially condensed. Note that the curves in figure 6 and figure 7 are based on 10 per cent of the vapor being differentially condensed.

#### SOLAR HEATING RATIO

The heating ratio,  $\xi$ , expressing the performance of the solar heat exchanger operation with the intermittent cooler, is defined as:

$$\xi = \frac{\text{heat absorbed by the contents of the generator}}{\text{incident direct solar radiation on effective area (aperture) of the collector}}$$

In actual tests, the generator is directly heated with the concentrated radiation from a parabolic reflector, and the denominator is taken as the beam component intercepted by the unshaded area of the collector. The difference between the intercepted energy and the heat absorbed by the contents of the generator is the sum of the losses due to optical imperfections

of the solar exchanger system, to convection, to reradiation and to the heat capacity of the metal parts of the generator. General treatment of the factors to account for the energy balance of the solar heating system is difficult. However, the magnitude of these factors has been measured experimentally and typical  $\xi$  values will be presented in the next section.

## SOLAR REGENERATION EXPERIMENTS

Three sets of experiments were performed with three intermittent absorption units which differ from each other either in refrigerant-absorbent system or in physical design. The units used in sets No. 1 and No. 2 are similar in design but have different charges. The unit used for set No. 3 differs from the others in design: the bottom of the generator is concave in contrast with the convex shape of the other models; the constructional design of this generator is shown in figure 9. The reflectors used were parabolic molded polystyrene shells lined with aluminized Mylar polyester film and were mounted on a support convenient for manual altazimuth adjustments. The condensers were water-cooled in some experiments and air-cooled in others. During the progress of these experiments, temperatures were measured by means of thermocouples in wells located at appropriate points in the equipment. Solar radiation was measured with either a total or direct Eppley pyrliometer or with a G. E. radiation meter.

The results of these experimental runs are summarized in table 1. The values of the cooling ratio of  $\eta$  (experimentally determined), the solar heating ratio  $\xi$ , and the over-all performance ratio  $E$  (the product of  $\eta$  and  $\xi$ ) are shown with the condensate temperature, final generator temperature, time of regeneration and the amount of refrigeration produced. The indicated performance of the ammonia-water system for set 1 of the experiments is based on the assumption that all of the condensate was ammonia, and the values of refrigeration (also  $\eta$  and  $E$ ) shown are high by 5 to 10 per cent. The higher solar heating ratio obtained with the ammonia-water system is due in part to the lower viscosity of ammonia solutions which result in better heat transfer characteristics

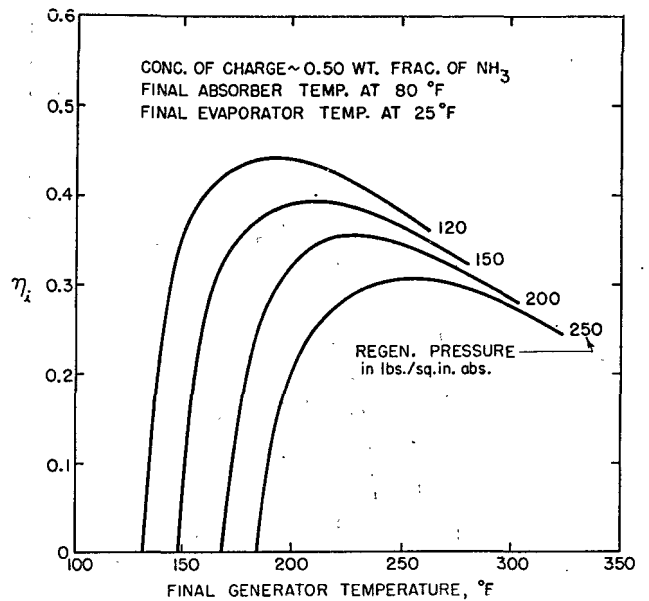


Figure 6. Ideal cooling ratio for the system ammonia-water. Generator temperature at start of regeneration is 80°F. Fractionation is equivalent to differential condensation of 10% (by wt) of vapor leaving generator

inside of the generator, thus lowering metal temperature and thermal losses.

In typical experiments with the ammonia-water units, the distribution of the incident beam radiation was: 33 per cent optically lost (due to departure of reflectivity and absorptivity from unit), 3 per cent lost by heating of the metal of the generator, 40 per cent to generator contents, and 24 per cent to thermal losses. For the Freon 21-glycol ether units, the typical distribution is: 33 per cent optical loss, 2 per cent metal storage loss, 30 per cent to generator contents, and 35 per cent thermal losses.

Table 1. Summary of experimental solar cooler regeneration data

Run No.	Final gen. temp.	Condensate temp.	Time, hours	Refrigeration, btu	Cooling ratio $\eta$	Heating ratio $\xi$	Over-all ratio $E$
<i>Set 1 (Ammonia — water unit, charge 3.47 # NH<sub>3</sub> and 4.4 # H<sub>2</sub>O)</i>							
10-15 <sup>a</sup>	255	86°F	2.0	787	0.38	0.39	0.15
10-16 <sup>a</sup>	265	85°F	2.0	847	0.38	0.41	0.16
10-17 <sup>a</sup>	251	82°F	2.2	814	0.40	0.38	0.15
10-18 <sup>a</sup>	259	81°F	2.5	892	0.41	0.35	0.14
<i>Set 2 (Freon-21-glycol ether unit, charge 7.44 # F-21, 12.5 lb. glycol ether)</i>							
6-15 <sup>a</sup>	260	82°F	3.0	473	0.26	0.29	0.075
6-21 <sup>a</sup>	283	79°F	2.8	522	0.25	0.31	0.078
9-27 <sup>b</sup>	256	80°F	4.3	401	0.26	0.19	0.049
10-2 <sup>c</sup>	277	92°F	3.0	447	0.22	0.26	0.057
10-4 <sup>c</sup>	320	79°F	4.5	575	0.23	0.22	0.051
<i>Set 3 (Ammonia — water unit, charge 3.64 lb. NH<sub>3</sub> and 4.63 lb. H<sub>2</sub>O)</i>							
2-29 <sup>b</sup>	217	50°F	3.4	1 092	0.40	0.40	0.16
3-1 <sup>b</sup>	238	59°F	3.8	1 072	0.41	0.37	0.15
3-7 <sup>b</sup>	291	73°F	3.7	1 152	0.33	0.46	0.15

<sup>a</sup> Rigid unit, water-cooled condenser.

<sup>b</sup> Unit with flexible connection, water-cooled condenser.

<sup>c</sup> Unit with flexible connection, air-cooled condenser.

NOTE: Refrigeration, cooling ratio and over-all ratio are based on the assumption that all condensate is refrigerant for sets 1 and 2.

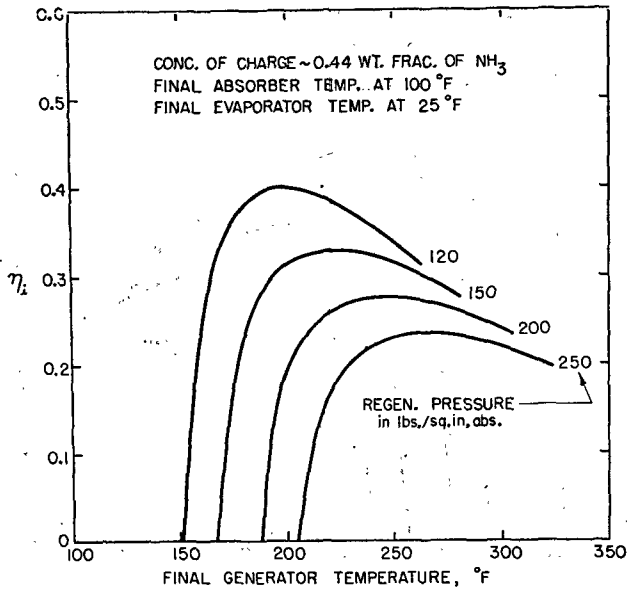


Figure 7. Ideal cooling ratio for the system ammonia-water. Generator temperature at start of regeneration is  $100^{\circ}\text{F}$ . Fractionation is equivalent to differential condensation of 10% (by wt) of vapor leaving generator

#### PROGRESS OF REGENERATION OF FREON-GLYCOL ETHER UNIT

In experiments in which the units with flexible connections were used, it was possible to follow the progress of regeneration by weighing the amount of refrigerant in the condenser. The results of one of these experiments is shown in figure 10 as  $\eta$ ,  $\xi$ , and  $E$  vs. the regeneration temperature. The amount of refrigeration obtained is also shown. The  $\eta$  vs. generator temperature curve is, in effect, an experimental generation of a curve similar to those of figures 4 and 5, except that the condensing temperature varies (as is the case in practical operations).

#### REFRIGERATION WITH AMMONIA-WATER UNIT

In the third set of experiments, the weight of the evaporator was continuously measured by means of a strain gage arrangement. Records of the relationship among time, amount of refrigeration, and various pertinent temperatures were obtained. Heat transfer to the evaporator was found to be the rate determining step during refrigeration. The mode of this heat transfer is natural convection and the rate of transfer was found to be proportional to the surface area of the evaporator and to the 1.25 power of the difference in bulk temperatures of the refrigerated space and the refrigerant.

#### Intermittent absorption unit of higher capacities

Larger refrigeration units could be based on the same design as the small intermittent unit. But, simple enlargement of the equipment would mean an excessively large solar collector, as the household

unit was designed to have a long cooling period following a short period of regeneration with a reflector used for other purposes also. Cost of energy collection becomes of prime importance when the solar exchanger is used primarily with the cooling units. The collector size will be greatly reduced by extending the regeneration period, so that most of the daily radiation is collected. To accomplish this change, the design of the simple household unit may be modified by increasing the evaporator heat transfer surface to decrease the refrigeration period. By this change, the relative lengths of refrigeration period to regeneration period may be reduced from 12 (as for the small food cooler) to 3 or 4. It is then necessary to provide sufficient storage of "cooling" to provide needed refrigeration during regeneration.

Utilization of the solar collector could also be increased by any of a number of cycle modifications which permit regeneration to proceed without interfering with refrigeration. For example, a dual intermittent unit with common condenser and evaporator would accomplish this end (2). If indirect heating of the generator were used, in cases where regeneration and refrigeration proceed simultaneously, the size of the generator can also be reduced by providing heat storage in the heating system and operating the generator over longer periods of time. The economic advantage of this process depends on savings realized with the smaller equipment as against the costs and operation of a storage system with provision for circulation of heat transfer fluid.

The cost of the solar heat exchanger could be further reduced by increasing the cooling ratio of the absorption unit by operation and/or design modifications. For ice-producing units with low cooling ratio due to low evaporator temperatures, increasing  $\eta$  becomes more desirable. The following paragraphs present three possible methods to obtain better performance ratios with the ammonia-water system.

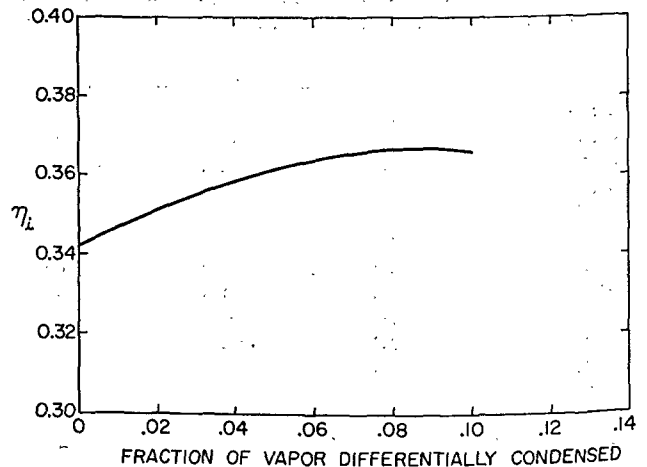


Figure 8. Effect of differential condensation of vapor leaving generator on the ideal cooling ratio. System is ammonia-water. Operating parameters are: final generator temperature  $250^{\circ}\text{F}$ , condensing pressure 150 lb/sq in abs, final absorber temperature  $100^{\circ}\text{F}$ , and evaporator temperature  $40^{\circ}\text{F}$



A simple method to increase  $\eta_i$  is to alter the refrigeration part of the cycle somewhat so that the final evaporator temperature is higher. For example, in producing ice from water initially at 90°F, it is possible to remove most of the sensible heat from the water during the last part of the cooling period and permit the evaporator temperature to rise to 40°F; this pre-cooled water is then frozen in the succeeding cycle during the first part of the refrigeration period. The effect on  $\eta_i$  is almost equivalent to operating the evaporator at 40°F, much above the freezing point of water. For example, when the operating conditions are: final regeneration temperature 250°, condensing pressure 10 atm, final absorber temperature 100°F, the  $\eta_i$  value is 0.32. With the same operating conditions but with evaporator temperature at 25°F,  $\eta_i$  value as given in figure 7 is 0.27. In this example, not only was the cooling ratio increased by 18 per cent, but also the evaporator temperature is 17°F at end of freezing, thereby gaining a better potential for heat transfer.

The cooling ratio could also be increased by reducing the absorber temperature during the latter part of the cycle. This is accomplished with an auxiliary intermittent unit which can be regenerated with the sensible heat from the hot absorbent in the main unit. For example, for operation with the final regeneration temperature reaching 250° to 300°F, the hot absorbent liquid can be used to distill ammonia in an auxiliary unit having 0.54 as much charge as the main unit by weight but at a higher concentration, 55 wt per cent of ammonia. The cooling effect from this small unit is enough to lower the final absorber temperature to 70°F. The  $\eta_i$  of the main unit is increased to 0.31.

The low  $\eta$  values of the simple ammonia-water units are due partly to the large amounts of residual refrigerant retained by the water in the evaporator,

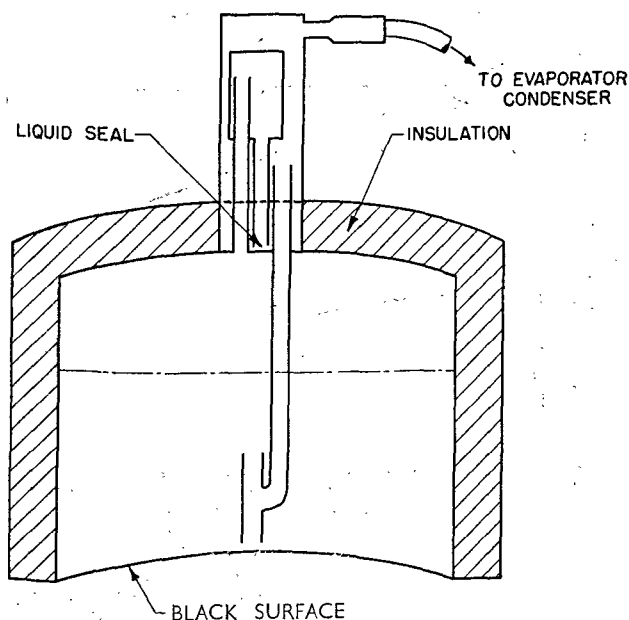


Figure 9. Schematic diagram showing the internal construction of the generator of an intermittent absorption cooler of the type shown in figure 1

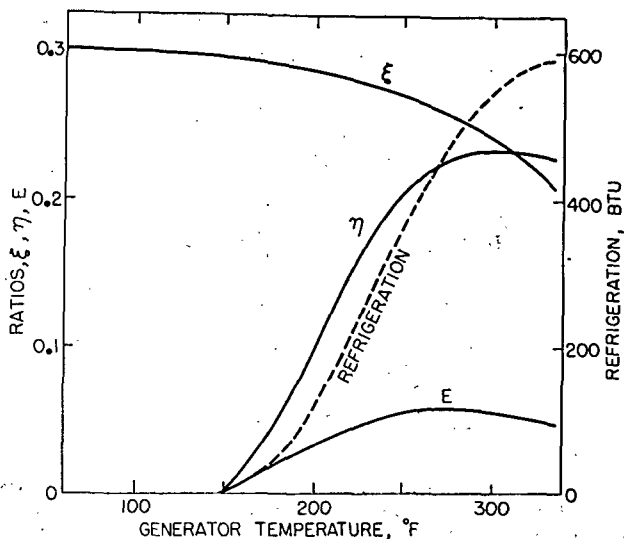


Figure 10. Progress of regeneration of an intermittent absorption cooler; condenser was air-cooled; refrigerant-absorbent system used was Freon-21-tetraethylene glycol dimethyl ether

especially in the case of ice production, and partly to rejecting and losing the sensible heat of the hot absorbent. The cooling ratio will be substantially increased if heat exchange is provided to recover this sensible heat and a fractionating unit is provided to reduce the amount of water distilling into the evaporator. A refrigerating system with these improvements is schematically presented in figure 11. The solar heat exchanger is assumed to be similar in characteristics to that described by Löf *et al.* (11). The radiation is concentrated by a parabolic cylinder reflector on to a tubular receiver. The length of the cylinder is 12 feet, the aperture is 6.19 feet, and the reflectivity of the reflecting surface is 0.76. This exchanger is assumed to perform as the thermosyphon reboiler (generator) of a distillation column. The separator as illustrated could be part of the column. The stripped hot liquid from the generator gives up its sensible heat to the fractionator feed stream before entering the absorber. The rate of liquid flowing from storage to be regenerated depends on the radiation available; it should be so regulated to maintain the proper temperature at the outlet of the tubular receiver. A fractionator with the equivalent of three theoretical plates (e.g., about 2 ft of packing) and operated with a reflux ratio of 0.47 (i.e. 32 per cent by wt of the liquid from the condenser is returned to the top of the rectifier) will yield a distillate of better than 99 per cent ammonia. Refrigeration and regeneration can proceed simultaneously in this system except for a short time when the rich absorbent drains by gravity from the absorber to storage. The evaporation period, hence, could be extended over 24 hours excepting for the short intervals necessary to change operations. This arrangement will reduce the requirement for evaporator heat transfer area to a minimum and take advantage of the lower night-time temperature as suggested by Trombe and Foex (5).

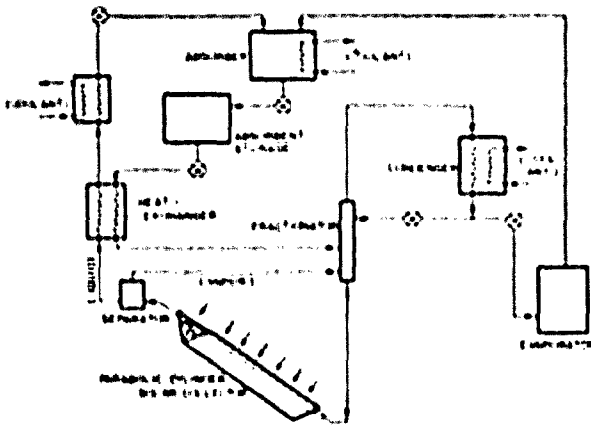


Figure 11. Schematic diagram of an intermittent absorption cooler which includes a fractionator and a heat-exchanger for sensible heat recovery.

The dependence of the  $\eta_c$  value on regeneration temperatures has been calculated for this equipment and is presented in figure 12. The evaporator is maintained at temperatures below 25°F, for ice production. The unit is charged with an aqueous solution 44 per cent by wt of ammonia. The regeneration pressure is 13.6 atmospheres (corresponding to condenser temperature in the range of 100°F) and absorber temperature is maintained at 100°F. The cooling ratio did not drop off rapidly in the same range of regeneration temperatures as for the simple units because more efficient fractionation kept the amount of water in the evaporator at a lower level. The relation of heating ratio,  $\xi$ , to regeneration temperature as calculated by the method of Löf *et al.*, and that of  $E$ , the over-all performance to regeneration temperature are also presented in figure 12. From these curves, the estimated daily ice production from water at 90° is 145 lb if the incident direct solar radiation received is 2000 Btu sq ft and the generation temperature is 220°F.

### Continuous solar absorption systems

The good correlation between solar energy supply and space cooling demand suggests solar operation of absorption air-conditioners. This possibility is more attractive in a temperate climate such as that of the United States if the same flat-plate collector can be used for winter heating in addition to operation of the absorption cooler. Accordingly, a design study of a combination of a flat-plate solar collector and a continuous absorption air-conditioner has been made and developmental research is being carried out. Direct substitution of a solar heated fluid as the heat source of a conventional air conditioner does not appear promising in view of the variable output of the flat-plate collector. Even so, there is enough merit to warrant experimental investigation. The system of collector and cooler being studied is designed to partially overcome the variability and generally low intensity of energy. The system is shown in figure 13 (with the heat exchangers for

sensible heat recovery omitted). A pump is used in this design for recirculation of the absorbent to the generator. The refrigerant-absorbent combination used is Freon-21-tetraethylene glycol dimethyl ether.

As in the case of intermittent coolers, low performance coefficients will reduce the cost of the energy collecting equipment. Similarly, extensive sensible heat recovery should be provided as the cost of solar collector to achieve an increment of output appears to be higher than that of heat exchanger surface. Operating the evaporator at as high a temperature as possible will also improve cooler performance. Low generator temperature will improve collector performance, but, at the same time, concentration of refrigerant becomes high in the absorbent to the absorber and the mass transfer potential becomes lower. The operation of the absorber is not critical. The main problem in the experimental search of the cooler tests with the development of a highly efficient absorber.

In the design study, the concentration of refrigerant in the absorbent leaving the absorber was assumed to be 90 per cent of the saturation value. The cooler performance ratio was estimated to be 0.64 with the generator temperature at 190°F, the condenser and the absorber both at 100°F, and the evaporator at 50°F. In actual experimentation, the performance ratios obtained were less than half of the design value. This was attributed to the poor performances of all of the several absorbers used. Poor absorption meant more absorbent was necessary to absorb a quantity of refrigerant. In terms of the continuous absorption unit, higher liquid circulation rates are required, thus lowering the cooling ratio. Also, with poor absorber operation, the evaporator operating pressure became higher, resulting in higher

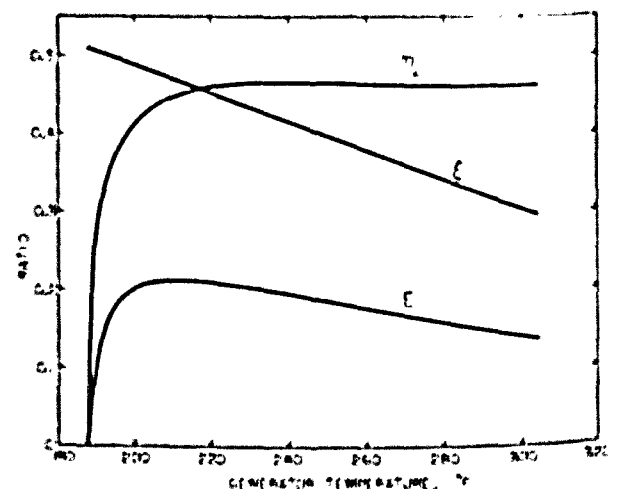


Figure 12. Performances of the intermittent solar cooler as shown in figure 11 and its components, the solar heat exchanger and the absorption cooling unit, as related to generator temperature. Operating conditions are: evaporator temperature 25°F, generation pressure 13.6 atm, absorber temperature 100°F. The charge is 44% (by wt) ammonia solution.

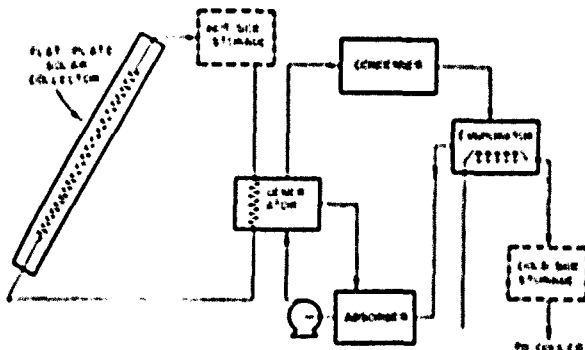


Figure 13. Schematic diagram of a continuous solar air conditioner with flat-plate collector. Alternative hot-side and cold-side storage units are shown. Heat exchangers for sensible heat recovery are not shown

evaporator temperatures. If absorption can be improved, the cooler would operate at an acceptable performance level as the other components of the experimental unit were performing as expected.

### Economic considerations

The costs of producing cooling with solar absorption coolers are of necessity still speculative, as the devices and systems are for the most part still in the developmental state. However, the following estimates are made on the basis of assumptions as noted.

(a) The intermittent food cooler having a capacity of 1 000 btu cycle (a *minimum* size, suitable for small family use), is estimated to cost \$50. The reflector system required for regeneration is estimated to cost \$18, and can also serve other purposes such as cooking; charging one-half of the reflector cost to the cooler, the investment becomes \$59. The cooler unit should have very long life and the annual cost of owning it would depend on prevailing interest rates; at 10 per cent per year, the annual cost of the cooler would be \$5. The reflector, used for other purposes, also would have a shorter life, and the annual cost chargeable to the cooler is estimated at \$3. The cost of ownership of the cooler and associated equipment is thus estimated to be \$8 per

year. Some parts of this equipment could be of local (rural) manufacture, such as the box and the mounting for the reflector. The cooling unit itself could be manufactured in any area where pressure vessels are made or serviced.

(b) The "continuous" ice machine described above is estimated to cost \$200, with the solar exchanger costing another \$150. Its annual productivity is about 45 000 pounds of ice in generally clear climates. Again, the cooling equipment should be long lived, and at 10 per cent per year, the annual cost of the cooler would be \$30. The solar exchanger life is again estimated to be less than cooler life, and an annual cost of one-fifth of the investment, or \$30, appears reasonable. The total annual cost is then estimated at \$60. Neglecting the unknown costs of operation, ice from a machine of this type would thus be expected to cost on the order of \$4 per ton. It should be noted that these estimates are reasonable *up or down, by wide amounts*, depending on the number of units manufactured, costs of transport, etc. It should also be noted that an ice machine making 150 pounds of ice per day may not represent an optimum size, that larger units would be more economical and that operating costs per ton of ice produced (not included in the above estimate) would be reduced.

### Conclusion

While solar absorption coolers for food preservation, ice manufacture or comfort cooling are still in the developmental stage, it appears that intermittent units can be built, with overall coefficients of the order of one-sixth, which require some mechanical manipulation and which operate from forming solid exchangers. Operation of continuous coolers, while attractive in principle, is dependent on solution of the difficult problem of satisfactory operation of the absorber.

### Acknowledgment

The program of which these cooling studies are a part has been generously supported by the Rockefeller Foundation.

### References

- 1 Williams, D. A., Chung, R., Lee, G. O. G., Foster, D. A., and Duffie, J. A., Cooling Systems Based on Solar Regeneration, *Refrigerating Engineering* 66:22, 1958.
- 2 Lawrenstadt, M., Hangan, F. M., and Farver, F. A., Solar Air Conditioning With an Ammonia-Water Absorption Refrigeration System, *ASME, Paper 48-A-176*, 1958.
- 3 Chennappa, J. C. V., Experimental Study of the Intermittent Vapour Absorption Refrigeration Cycle Employing the Refrigerant Absorbent Systems of Ammonia-Water and Ammonia-Lithium Nitrate, *J. Solar Energy Soc. & Eng.* 5:119, 1961.
- 4 Duffie, J. A., Chung, R., and Lee, G. O. G., Solar Absorption Cooling, Paper presented at the Solar Energy Conference held at Mont Lewis, 1958.
- 5 Tromble, F., and Fox, M., The Production of Cold by Means of Solar Radiation, *J. Solar Energy Soc. & Eng.* 1:11, 1957.
- 6 Chung, R., Lee, G. O. G., and Duffie, J. A., Solar Space Cooling, *Chem. Eng. Prog.* 55:11, 1959.
- 7 Lee, G. O. G., House Heating and Cooling with Solar Energy, in *Solar Energy Research*, Univ. of Wisconsin Press, Madison, 1955.
- 8 Danos, J. H., Solar Air Conditioning and Solar Refrigeration, *J. Solar Energy Soc. & Eng.* 2:11.
- 9 Harwood, H., Solar Energy, *Proc. Fourth and Fifth Agricultural Experiment Stations* 176:272 & 206, 1953.
- 10 Blue, R. W., Title Solar Heated Home, *Refrigerating, Heating & Ventilating* 12:107, 1953.
- 11 Lee, G. O. G., Foster, D. A., and Duffie, J. A., Energy Balance on a Prototype Solar Air Collector, *ASME Trans.* 1961.

### Summary

The application of solar energy to refrigeration or air cooling is an appropriate combination of energy source and energy utilization, as there is frequently a direct relationship of high ambient temperatures to high incident solar radiations. Absorption type cooling or refrigerating units appear, at the present state of development, to be more suited to solar operation than other types of machines. The Solar Energy Laboratory of the University of Wisconsin has carried on studies pertaining to solar operation of small capacity intermittent absorption refrigerators and continuous absorption air cooler.

Performance of solar coolers is conveniently described in terms of an over-all performance ratio,  $E$ , the ratio of cooling obtained to solar radiation incident on the collector.  $E$  is the product of a solar heating ratio,  $\xi$ , the ratio of solar exchanger output (cooler input) to incident radiation, and a cooling ratio,  $\eta$ , the ratio of cooling obtained to heat input to the cooler.

Intermittent absorption coolers of the simplest type have the functions of generator and absorber combined in one vessel, and condenser and evaporator combined in another; they are of simple design, with no moving parts. They require manual manipulation and can be readily adapted to solar regeneration with typical experimental performance ratios, for ammonia-water systems, of  $E = 0.16$ ,  $\xi = 0.4$ , and  $\eta = 0.4$ . Used for small food coolers, these units are regenerated with a solar reflector; a 48" reflector with a 2-hour regeneration period can provide 1 000 btu of cooling.

The selection of refrigerant-absorbent systems for intermittent absorption coolers can be based on physical and thermodynamic properties; system evaluations have been made for a number of systems and are summarized in the paper. The ammonia-water system appears to be the best of those considered, and can yield cooling ratios of 0.4 under realistic conditions for food preservation.

Experimental regeneration and refrigeration studies have been carried out with two refrigerant-absorbent systems and in units of two different designs. A typical solar regeneration performance of an ammonia-water unit showed the incident beam radiation on the reflector distributed as follows: 33 per cent optical loss, 3 per cent heat capacity loss in the generator, 40 per cent to generator contents, and 24 per cent to thermal losses from the generator.

For larger capacities, changes in the simple food-cooler designs are indicated, to obtain better use factors on the reflector and improve the performance of the coolers by recovery of sensible heat. Improved reflector use-factor (i.e., longer regeneration times) can be achieved by use of dual units, by cycle modifications which permit refrigeration to proceed during regeneration, or by provision of additional storage of "cooling" to carry through longer regeneration times. Improved cooler performance coefficients, particularly important for ice manufacture, which requires lower evaporator temperatures, can be obtained by precooling water which is to be frozen in the later stages of the refrigeration cycle, and freezing the water in the earlier part of the cycle when the evaporator temperature is lowest. Another method to obtain better coefficients is to cool the absorber during the later part of the cooling cycle with an auxiliary cooler.

A study of an ice-producing machine based on an intermittent ammonia-water cycle, using a solar exchanger consisting of a cylindrical reflector of 72 square feet area and a receiver-pipe serving as the generator of the cooler, indicates that its production of ice from water at 90°F should be about 145 pounds on a day when the beam radiation is 2 000 btu per square foot of the oriented receiver. In this cycle, nearly complete rectification is used, as is some sensible heat recovery, and evaporation (refrigeration) proceeds through all but a few minutes of the 24-hour day.

Continuous absorption air-conditioners are of interest, as there is frequently good correlation of solar energy supply and cooling requirements; in temperate climates the process is more attractive if the solar exchanger for supplying energy to the cooler can also be used for wintertime heating. Design and experimental studies of continuous air conditioners operating with flat-plate solar exchangers indicate that such systems are feasible if adequate performance of the absorber can be achieved.

While cost estimates of the equipment used in solar cooling are only tentative, with the cooling processes still for the most part in developmental stages, preliminary estimates put the cost of owning a minimum size manually manipulated food cooler at about \$8 per year. The cost of ice from the larger ice-making machine, considering *only* the cost and lifetime of the equipment, is estimated at about \$4 per ton.

## EMPLOI DE L'ÉNERGIE SOLAIRE POUR LA RÉFRIGÉRATION

### Résumé

L'application de l'énergie solaire à la réfrigération ou à la climatisation représente une heureuse combinaison de la source de force motrice et de l'utilisation de cette énergie, pour autant qu'il existe souvent un rapport direct entre des températures ambiantes élevées et l'incidence, élevée elle aussi, du rayonnement solaire. Les groupes de climatisation ou de réfrigération à absorption semblent se prêter mieux (dans l'état actuel de nos connaissances) que d'autres types de machines à l'utilisation de la force motrice fournie par le soleil. Le laboratoire d'énergie solaire de l'Université du Wisconsin a mené des études sur la question de l'utilisation de cette énergie dans des réfrigérateurs à absorption intermittente et des climatiseurs à absorption continue.

Le rendement des réfrigérateurs solaires peut commodément s'exprimer par un coefficient global de fonctionnement  $E$ , rapport entre le nombre de frigorifiques produites et le rayonnement solaire reçu par le collecteur.  $E$  s'obtient en faisant le produit du coefficient de chauffage solaire  $\xi$  par le rapport entre le débit de l'échangeur solaire (à l'entrée du réfrigérateur) au rayonnement incident et par un coefficient de refroidissement  $\eta$ , rapport entre le degré de réfrigération obtenu et la chaleur reçue par le réfrigérateur.

Les réfrigérateurs à absorption à fonctionnement intermittent du type le plus simple combinent les fonctions de générateur et d'absorbeur en une seule et même enceinte, tandis que le condenseur et l'évaporateur sont réunis dans une autre enveloppe. Leur conception est simple et ils n'ont pas de pièces mobiles. Ils exigent des opérations manuelles et peuvent facilement s'adapter à la régénération solaire avec des coefficients d'utilisation expérimentaux-type, pour les systèmes ammoniac-eau, de  $E = 0,16$ ,  $\xi = 0,4$  et  $\eta = 0,4$ . Il en est fait usage pour de petits réfrigérateurs destinés à conserver les denrées alimentaires. La régénération y est assurée par un réflecteur solaire. Un réflecteur de 48 pouces (1,22 m) ayant une période de régénération de deux heures peut produire 251 frigorifiques (1 000 Btu).

Le choix des systèmes réfrigérant-absorbant pour les réfrigérateurs à absorption intermittente peut reposer sur des considérations physiques et thermodynamiques. Des évaluations des divers systèmes ont été faites pour nombre de combinaisons et sont résumées dans le mémoire. L'association ammoniac-eau semble être la meilleure de celles qui ont été prises en considération, et elle peut donner des rapports de réfrigération de 0,4 dans des conditions réalistes de conservation de denrées alimentaires.

On a procédé à des recherches expérimentales sur la régénération et la réfrigération, avec deux

systèmes réfrigérant-absorbant et des groupes de conceptions différentes. Il ressort du comportement-type, vis-à-vis de la régénération solaire, d'un groupe ammoniac-eau, que le rayonnement contenu dans le faisceau incident qui porte sur le réflecteur se répartit comme suit : pertes optiques, 33 p. 100; perte de capacité thermique dans le générateur, 3 p. 100; perte dans le contenu du générateur, 40 p. 100; et pertes thermiques du générateur, 24 p. 100.

Il est indiqué, aux plus grosses capacités, de procéder à des modifications de la conception des réfrigérateurs simples, de manière à obtenir de meilleurs facteurs d'utilisation au réflecteur et à relever leur rendement par la récupération de la chaleur sensible. On peut réaliser de meilleurs facteurs d'utilisation du réflecteur (c'est-à-dire des temps de régénération plus longs) en se servant de groupes jumeaux, en modifiant le cycle de réfrigération de telle sorte que la réfrigération se poursuive pendant la régénération, ou en augmentant la capacité de mise en réserve du « refroidissement » de manière à pouvoir faire appel à de plus longs cycles de régénération. On peut améliorer le coefficient du réfrigérateur, particulièrement important pour la production de glace, qui exige de plus basses températures d'évaporateur, en refroidissant tout d'abord l'eau qui doit être congelée au cours des stades ultérieurs du cycle de réfrigération et en congelant cette eau pendant le début du cycle, moment auquel la température de l'évaporateur est à son minimum. Une autre méthode propre à l'amélioration des coefficients consiste à refroidir l'absorbeur pendant la seconde phase du cycle de refroidissement, en se servant pour ce faire d'un réfrigérateur auxiliaire.

L'étude d'une machine productrice de glace, dont le fonctionnement repose sur un cycle intermittent ammoniac-eau, faisant usage d'un échangeur solaire constitué par un réflecteur cylindrique d'une surface de 72 pieds carrés (6,7 m<sup>2</sup>) et d'un collecteur jouant le rôle de générateur pour le réfrigérateur, indique que sa production de glace, à partir d'eau à 90 °F (32 °C) doit être de l'ordre de 145 livres (66 kg) par jour quand le faisceau solaire fournit 2 000 Btu (502 calories) de rayonnement par pied carré, (5 397 calories par m<sup>2</sup>) de surface du collecteur orienté. On se sert, dans ce cycle, d'une rectification presque complète, ainsi que de la récupération de la chaleur sensible, et l'évaporation (réfrigération) se poursuit sur la presque totalité (à quelques minutes près) de la journée de 24 heures.

Les climatiseurs à absorption continue sont intéressants, car il y a souvent une bonne corrélation entre l'apport d'énergie solaire et les exigences du

conditionnement. Dans les régions à climat tempéré, le processus est plus intéressant si l'échangeur solaire qui sert à fournir de l'énergie au réfrigérateur peut également s'employer pour le chauffage d'hiver. Les recherches sur la mise au point de ces appareils et les expériences faites sur eux, particulièrement sur le type à fonctionnement continu, utilisant des échangeurs solaires à plaque plate, indiquent que de tels systèmes ne sont réalisables que s'il est possible de tirer un rendement satisfaisant de l'absorbeur.

S'il est vrai que les évaluations relatives au coût

du matériel sont purement provisoires, pour autant que les procédés de refroidissement ou de réfrigération en sont encore à leur stade de développement dans la majeure partie des cas, des évaluations préliminaires fixent les frais afférents à un réfrigérateur à aliments de taille minimum et à commande manuelle à 8,00 dollars par an environ. Le prix de revient de la glace que peut fournir la machine de plus grande taille, si on n'envisage que le prix de revient et la durée de service du matériel, est évalué à 400 dollars par tonne environ.

## UNITÉ FRIGORIFIQUE A ABSORPTION AVEC RÉFLECTEUR CONOÏDAL FIXE

Teodoro Oniga \*

Si l'énergie solaire est habituellement considérée comme une source de chaleur, il ne faut pas oublier qu'il s'agit en réalité de radiations électromagnétiques, comme l'a montré Pierre Casal (1), et que l'utilisation de cette énergie radiante pourrait être rendue particulièrement efficace, tout en évitant le passage apparemment obligatoire par l'intermédiaire thermique, si l'on copiait le mécanisme de la photosynthèse (2).

D'autre part, une source chaude peut très bien servir pour pomper la chaleur d'un endroit et la déverser dans le milieu en créant des trous froids dont l'utilité est manifeste surtout pour les pays qui, comme le Brésil, sont abondamment servis en photons infrarouges. Il n'y a aucun secret dans la technique de production du froid par ce moyen, à moins que ce ne soit l'aspect compétitif avec les sources solaires secondaires élaborées sous forme de houilles (noire, blanche, bleue, verte...) et qui se présentent sous une concentration dangereusement séduisante, si l'on ne songe au déshérentement énergétique de nos petits-fils qui en sera la conséquence (on leur laissera, il est vrai, un supplément d'énergie deutérique, mais on ne saura leur transmettre le supplément d'âme réclamé par Bergson).

On a maintes fois souligné l'emploi à des fins guerrières de presque toutes les conquêtes de la science. L'énergie solaire ne fait pas exception, si l'on convient de situer l'origine de son utilisation systématique dans les miroirs ardents d'Archimède défendant Syracuse contre Marcellus (vers 212 av. J.-C.). Cependant son emploi pacifique est bien plus ancien encore, car les Égyptiens du millénaire antérieur connaissaient déjà l'effet de serre qui est à la base des collecteurs solaires de nos jours.

*Premières réalisations*

Les cycles frigorifiques à absorption sont toutefois de date relativement récente. C'est François Carré qui, entre 1859 et 1862, construisit la première machine utilisant le mélange eau-ammoniacque (3). La suppression de la pompe, tentée tout d'abord sans succès par le physicien Geppert en 1899, fut reprise par les ingénieurs suédois Platen et Munters, puis par Maiuri, qui réalisèrent la machine à diffusion dans un gaz inerte, l'hydrogène, dont est sorti, entre autres réalisations industrielles, le réfrigérateur Electro-Lux.

Déjà en 1937 on enregistrait (au Brésil notamment) quelques tentatives d'adaptation d'un réflecteur parabolique à un réfrigérateur à absorption (4). Mais les essais n'ont jamais dépassé le stade expérimental, peut-être pour des raisons de commodité ou de manque d'intérêt. De nos jours, l'intervalle qui sépare la naissance d'une idée, issue du rêve d'un savant, de sa réalisation pratique n'est plus mesurée en siècles; il a été réduit à des années. On est donc en droit de s'étonner que le progrès ait été si lent en ce qui concerne les applications pratiques de l'énergie solaire. Ce n'est certainement pas en raison de quelque contradiction de principe, car les réalisations sont là pour démontrer qu'il est parfaitement possible d'extraire de la chaleur et du froid, de l'énergie mécanique ou électrique, de l'eau distillée ou des produits de photosynthèse dès qu'on se donne la peine de mettre à l'œuvre l'énergie solaire. Mais à côté des sommes fabuleuses qu'on a réservées pour résoudre des problèmes infiniment plus compliqués mais qui présentaient un intérêt militaire (on parle déjà de la bombe à californium, dont on n'avait fabriqué, il y a deux ans, que quelques milliers d'atomes), les ressources des centres pour l'étude des applications de l'énergie solaire sont distribuées au compte-gouttes. L'idéalisme est une condition nécessaire au progrès, mais il ne suffit pas.

Ceci nous amène à examiner du point de vue strictement économique l'intérêt de poursuivre des recherches de ce genre.

*Aspects économiques*

Une machine frigorifique à compresseur de fabrication locale (les données qui suivent sont basées sur des prix brésiliens de 1960), de 9 pieds cubes (255 litres environ) de volume utile, coûte l'équivalent de quelque 200 dollars et consomme annuellement 600 kWh (1/6 CV pendant 40 p. 100 du temps, comme à Rio de Janeiro par exemple, où la température moyenne annuelle est de 25,6 °C avec un minimum absolu de 12,8 °C), soit environ 1 500 à 2 000 cruzeiros, ou 8 dollars. Une machine frigorifique à absorption coûterait jusqu'à 20 p. 100 plus cher (collecteur solaire inclus), mais ne consommerait rien, de sorte que la différence s'amortirait au bout de cinq ans. Il n'y aura donc pas d'obstacle d'ordre économique à la fabrication industrielle de ces machines (ou plutôt de ces unités frigorifiques, car elles sont exemptes de pièces mobiles), dès que le problème sera convenablement résolu du point de vue technique.

\* \* Directeur, Instituto Nacional de Tecnologia, Centro de Estudos de Mecânica Aplicada, Rio de Janeiro.

Il est vrai que les réfrigérateurs à absorption ne se fabriquent normalement que pour des capacités inférieures à 150 dm<sup>3</sup> (5,3 pieds cubes), étant donné leur consommation élevée en gaz de ville ou en pétrole lampant. Mais une fois que le coût de l'énergie diminue sensiblement, rien n'empêche la construction d'unités plus grandes, atteignant 7 à 10 pieds cubes (200 à 300 dm<sup>3</sup> environ).

En dehors de l'aspect purement économique, d'autres avantages supplémentaires doivent être signalés :

a) Production subsidiaire d'eau chaude, au moyen d'une circulation par thermosiphon de l'eau de refroidissement du précondenseur;

b) Indépendance énergétique totale, ce qui permet d'installer des appareils de réfrigération dans les lieux les plus isolés, éloignés ou inaccessibles;

c) Demande de froid proportionnelle à l'insolation (ce qui n'est pas le cas lorsqu'on utilise l'énergie solaire pour le chauffage : l'insolation est réduite en hiver lorsqu'on a le plus besoin de chaleur, et ceci conduit à des installations trop grandes).

En vue de ces perspectives, le CEMA<sup>1</sup> a entrepris une étude plus détaillée du problème, et les résultats obtenus jusqu'à présent, font l'objet de cette communication. Les deux sections en sont consacrées respectivement à l'étude de la construction interne de l'unité frigorifique et au captage de l'énergie solaire au moyen d'un réflecteur conoïdal fixe spécialement conçu pour ce genre d'applications. Ces idées et résultats n'ont rien de spectaculaire, mais leur discussion dans le cadre de la Conférence des Nations Unies sur les sources nouvelles d'énergie pourrait suggérer des moyens pratiques et coordonnés d'action visant surtout les pays sous-développés.

## Le cycle à absorption

### Principe de fonctionnement et choix du fluide

La machine à absorption est une machine purement thermique, c'est-à-dire que l'énergie nécessaire à l'entretien du processus est fournie sous forme de chaleur. Le processus peut être continu ou périodique, ce dernier mode étant normalement adopté dans les petites installations ménagères à cause de sa simplicité.

Le chauffage fait passer à l'état gazeux le fluide frigorigène en dissolution dans un fluide absorbé; après séparation de la vapeur entraînée, on liquéfie le fluide frigorigène sous la pression de sa propre vapeur dans un condenseur refroidi à l'air ou à l'eau; le liquide pur ainsi obtenu est ensuite détendu au moyen d'un robinet de réglage et amené dans l'évaporateur à l'état gazeux avec rafraîchissement de l'ambiance. Les vapeurs sont absorbées dans l'absorbé par la solution pauvre refroidie pour être de nouveau chassées de la liqueur enrichie.

Le fluide frigorigène le plus indiqué pour le cycle à absorption est l'ammoniac, et ceci pour les raisons suivantes : a) elle est très soluble dans l'eau et facilement libérable par la chaleur; b) c'est une substance très commune et non toxique; c) la pression de vapeur est, de tous les fluides communs, la plus élevée (voir, par exemple, le diagramme figure 14 de la référence 5); d) l'absorption dans l'infrarouge est très bonne, tout comme celle de l'eau.

Les courbes pression-température en fonction de la concentration figurent dans presque tous les traités de thermodynamique et de réfrigération. Nous avons établi, pour la commodité du travail, un réseau d'iso- $p$  avec  $t$  °C en abscisse et  $\text{NH}_3$  p. 100 en ordonnée.

### Description de l'unité frigorifique

La figure 1 montre schématiquement l'organisation de l'unité frigorifique, qui comprend essentiellement :

a) Un *générateur* constitué par la chambre de chauffe 1, le corps du générateur 2, un conduit de sortie 3 des vapeurs et un séparateur 4;

b) Un *condenseur* à deux étages, le premier 5 à l'extérieur et le second 7 à l'intérieur de la chambre froide 14, séparés par un clapet de non-retour 6;

c) Un *évaporateur* 10, précédé par le conduit de sortie 8 du liquide et le détendeur 9;

d) Un *absorbé* 11, relié au générateur par des valves 12 à pression constante et muni d'un serpentin auxiliaire à valve de contrôle 13;

e) Enfin, une *chambre froide* 14 qui sert par exemple l'intérieur de l'armoire frigorifique 15.

Le générateur 2, qui contient initialement une solution riche (à 40 p. 100 d'ammoniac dans l'eau), reçoit la chaleur solaire concentrée soit à l'intérieur (lorsqu'on utilise une « cellule solaire », comme nous l'expliquerons plus loin, ou un concentrateur parabolique), soit à l'extérieur du récipient cylindrique (c'est le cas, notamment, lorsqu'on emploie le réflecteur conoïdal décrit dans la dernière section du présent mémoire). Les vapeurs de  $\text{NH}_3$ , libérées de la solution ammoniacale par échauffement à 70 °C (8 atm. de pression), passent à travers le conduit 3 vers le séparateur 4, qui retient la vapeur d'eau entraînée (la proportion de vapeur entraînée est relativement faible, de l'ordre de 1 à 5 p. 100 suivant la température, mais il est important de la retenir afin d'éviter qu'elle ne se dépose sous forme de glace, ce qui boucherait les conduits). Du séparateur, les vapeurs pénètrent dans le serpentin 5, où leur température baisse jusqu'à 50 °C environ, avec une chute correspondante de pression, laquelle tombe à 5,2 atmosphères. Le second étage du condenseur (et c'est là une des originalités du système) se trouve à l'intérieur de la chambre froide, de sorte qu'une partie des frigories produites en excès est utilisée pour des fins de condensation, ce qui élimine les parties mobiles (pompe de circulation, ventilateur).

Du réservoir d'ammoniac liquide 7, un conduit à section capillaire 8 alimente le détendeur 9, qui débouche dans l'évaporateur 10, où la pression est maintenue autour de 3,6 atm. Dans l'absorbé 11,

<sup>1</sup> Le Centro de Estudos de Mecânica Aplicada (CEMA) a été créé en 1952 comme organe annexe à l'Instituto Nacional de Tecnologia de Rio de Janeiro, ses plans de recherches étant subventionnés par le Conselho Nacional de Pesquisas.



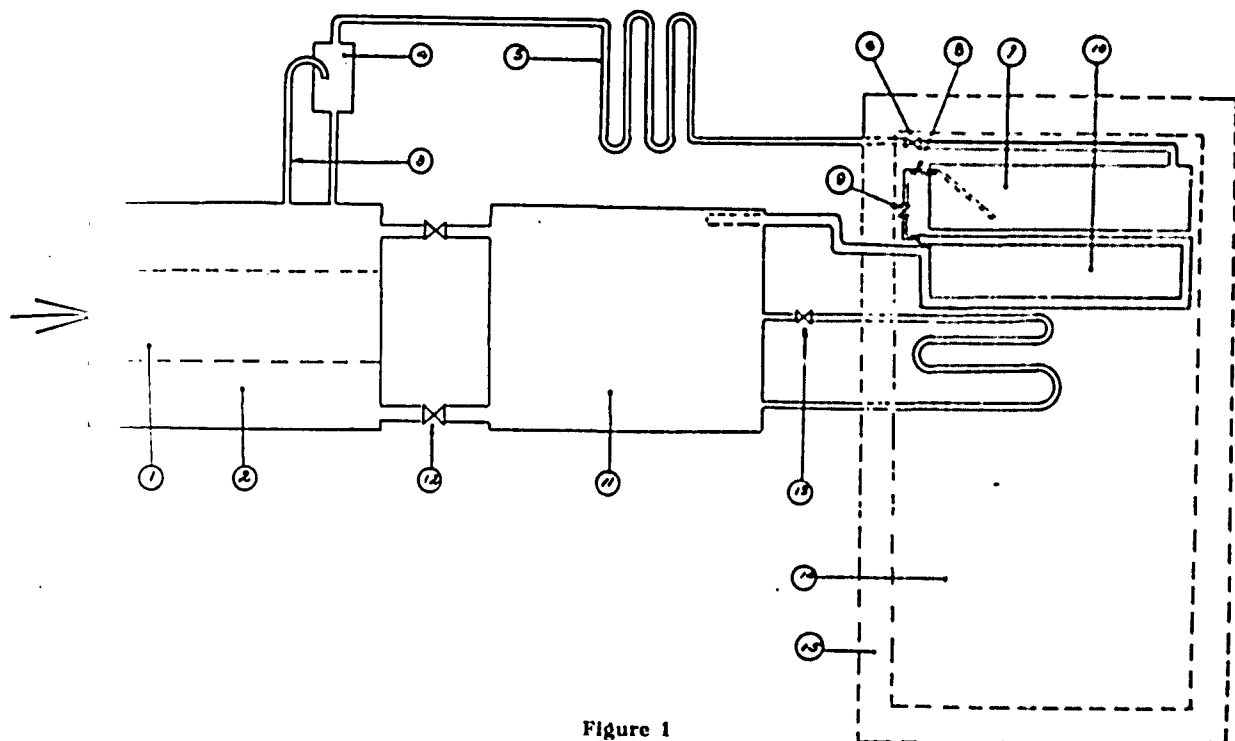


Figure 1

la pression n'étant que de 3,0 atm., les vapeurs seront continuellement absorbées, ce qui aura pour effet d'enrichir progressivement la solution. Le serpentin d'appoint 13 maintiendra la pression constante jusqu'à ce que la pression au générateur soit tombée en dessous de 3 atm.; à partir de ce moment, il y aura échange de  $\text{NH}_3$  à travers les valves 12, la liqueur riche sera reconstituée et le cycle pourra recommencer. L'apport de chaleur sera fait durant quatre heures d'insolation et, la capacité du condenseur 7 est suffisante pour assurer le fonctionnement pendant 24 heures sans interruption.

Ce cycle, dont la réalisation pratique et le fonctionnement entièrement automatique sont dus à Remigio Franco Lazo, technicien péruvien et collaborateur du CEMA, a fait l'objet d'une demande de brevet d'invention au Brésil.

#### Calculs thermodynamiques

On part d'une armoire frigorifique de 9 pieds cubes (255 litres environ) de capacité utile, soit environ 12 pieds cubes de capacité interne brute. Ceci correspond à une surface extérieure totale d'environ  $4,7 \text{ m}^2$  (dimensions :  $76 \times 72 \times 120 \text{ cm}$ ). En admettant une température ambiante de  $30^\circ\text{C}$  et une température interne de  $-2^\circ\text{C}$ , la perte horaire, pour une isolation de 8 cm de liège, est de  $20 \text{ fg/m}^2\text{h}$ . Il s'ensuit que la perte journalière sera de :

$$4,7 \times 20 \times 24 = 2\,256 \text{ fg/jour}$$

Pour refroidir 40 kg de denrées, de chaleur spécifique 0,85, on dépensera :

$$40 \times 0,85 (30 - (-2)) = 1\,088 \text{ fg/jour}$$

En y ajoutant les pertes par ouverture fréquente de la porte, qui doivent atteindre 20 p. 100 environ du total ci-dessus, on arrive à une dépense journalière de 4 012 fg/jour.

Un kilogramme d'ammoniaque produit 305,6 fg en s'évaporant à  $-5^\circ\text{C}$ . En retranchant la chaleur du liquide, maintenue à  $+5^\circ\text{C}$ , et les besoins en frigories au second étage du condenseur, soit

$$0,5205 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}. [5^\circ - (-5^\circ) + (50^\circ - 5^\circ)] = 28,6 \text{ fg/kg,}$$

ainsi que l'échauffement de l'absorbant, qui est de l'ordre de  $1,4^\circ\text{C}$  par heure et consomme environ 15,6 fg par cycle, il reste une production utile de froid de :

$$305,6 - (28,6 + 15,6) = 261,4 \text{ fg/kg}$$

Pour faire face à la dépense journalière de frigories il faudra donc véhiculer

$$4\,012 : 261,4 = 15,35 \text{ kg de } \text{NH}_3$$

Des concentrations initiale et finale (de 40 p. 100 et de 25 p. 100) on déduit ensuite la quantité totale de  $\text{NH}_3$  et d'eau nécessaire :

d'où

$$\frac{\text{NH}_3}{\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}} = 0,40, \quad \frac{\text{NH}_3 - 15,35}{\text{NH}_3 - 15,35 + \text{H}_2\text{O}} = 0,25,$$

$$\text{NH}_3 = 2 \times 15,35 = 30,70 \text{ kg}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 1,5 \times 30,70 = 46,05 \text{ kg}$$

Total : 76,75 kg de solution.

L'unité prototype a été projetée pour 32 kg de  $\text{NH}_3$  (dont 16 kg effectivement véhiculés) et 48 kg d'eau, soit un total de 80 kg de solution riche dans le générateur et 64 kg de solution pauvre dans l'absorbeur au début du cycle. Au bout de quatre heures d'échauffement, des 16 kg de  $\text{NH}_3$  libérés, 1/6 ou 2,67 kg auront passé dans l'absorbeur et le restant se sera accumulé dans le condenseur pour continuer à alimenter l'évaporateur pendant les 20 heures suivantes, avec une marge d'au moins 20 p. 100 à pleine charge.

#### Détails techniques et essais

La chaleur fournie au cycle doit être suffisante pour libérer les 16 kg de  $\text{NH}_3$  et, de plus, chauffer les 80 kg de solution de 30° jusqu'à 70 °C. La chaleur de vaporisation de l'ammoniaque à 50 °C (moyenne entre 30° et 70 °C) étant de l'ordre de 250 kcal/kg, on aura donc besoin de :

$$Q = 16 \times 250 + (64 + 1 + 16 \times 0,5205) (70^\circ - 30^\circ) \\ = 4\,000 + 2\,893 = 6\,893 \text{ kcal}$$

Avec une constante solaire de 2 cal/cm<sup>2</sup>min = 1 200 kcal/m<sup>2</sup>h et une transparence moyenne de l'atmosphère de 0,75 on peut escompter 900 kcal/m<sup>2</sup>h de puissance solaire incidente. Il s'ensuit que la surface efficace du collecteur, pour un rendement global de celui-ci d'environ 60 p. 100, devra être au moins égale à :

$$6\,893 : (4 \times 900 \times 0,60) = 3,19 \text{ m}^2$$

Le collecteur plan ne semble pas convenir pour une application de ce genre, en raison du coût assez élevé de la tuyauterie. Il est préférable d'utiliser un récipient cylindrique chauffé au moyen d'un concentrateur conoïdal, dont la description figure à la section suivante. Il suffit pour cela d'assurer un gradient de température suffisant pour que la transmission se fasse au débit voulu. Un cylindre de 40 cm de diamètre et de 90 cm de hauteur (volume utile de 110 litres environ) présente une surface extérieure d'échauffement de 1,13 m<sup>2</sup> et transmet 300 kcal/m<sup>2</sup>h °C. Il s'ensuit qu'une différence de température d'environ

$$6\,893 : (4 \times 1,13 \times 300) \cong 5^\circ\text{C}$$

serait suffisante (ce qui justifierait l'emploi d'un collecteur plan, s'il n'y avait l'aspect économique signalé plus haut).

Un calcul simple montre que l'échangeur atmosphérique de précondensation 5 doit avoir une surface extérieure d'environ 0,50 m<sup>2</sup>.

Le prototype, qui est en phase finale de montage, a été réalisé avec une machine frigorifique d'occasion de 9 pieds cubes dont on a retiré le groupe hermétique et modifié la disposition interne pour y loger les accessoires mentionnés plus haut.

Le coefficient d'utilisation sera relativement faible si l'on compte qu'il faudra recueillir 6 893 kcal pour

produire au moins 4 012 fg (58,3 p. 100 de rendement apparent). Mais à notre avis, cela n'altère pas l'aspect économique analysé au début de ce mémoire, une fois que le prix de fabrication en série n'excède pas de plus de 20 p. 100 celui des armoires frigorifiques ménagères.

### Le réflecteur conoïdal fixe

#### Les collecteurs classiques

Dans les applications de l'énergie solaire et tout spécialement dans celles qui se destinent à un usage domestique (chauffage, refroidissement, irrigation), il est important d'avoir une installation fixe, même si le rendement n'est pas le meilleur possible, car cela en simplifie la construction et l'entretien tout en apportant une bonne « motivation » pour l'utilisation des engins solaires. (L'échec des cuisinières solaires dans certaines régions de l'Inde montre que cet aspect n'est pas négligeable.)

Le collecteur plan offre l'avantage immédiat de pouvoir fonctionner pendant une grande période de temps avec des rendements acceptables, car la surface projetée reste supérieure à 70 p. 100 de la surface totale du collecteur lorsque le soleil décrit un arc de 90° (six heures d'insolation). En outre, le collecteur plan ne peut recueillir le rayonnement diffusé par les nuages, qui atteint parfois jusqu'à 20 p. 100 du rayonnement direct. Par contre, son rendement est assez faible par ciel couvert lorsqu'il s'agit de produire de la vapeur, donc d'assurer des températures au-dessus de 100 °C, d'où la nécessité de prévoir un taux de concentration de l'ordre de 4 à 5 au moins si l'on désire maintenir la température d'ébullition (quitte à limiter le flux calorifique enlevable).

Normalement, cette concentration est obtenue à l'aide d'un collecteur parabolique (de révolution) ou paraboloidal (cylindrique), ce qui permet d'atteindre, sous incidence directe, des températures assez élevées, de l'ordre de 3 000 °C ou plus pour les premiers, et jusqu'à 1 000 °C pour les seconds.

#### Déplacement du foyer

Mais le gros inconvénient, à notre avis, des concentrateurs de ce type est le fort déplacement du foyer lorsque le faisceau incident est dévié de quelques degrés à peine par rapport à la direction axiale.

C'est un fait d'expérience, mais on peut tenter une analyse plus précise en cherchant l'équation de la caustique pour une incidence  $\beta$  quelconque. Le rayon incident

$$y = mx + n \quad (m = \text{tg } \beta)$$

rencontrera la parabole  $y^2 = 2px$  en  $M$  et l'équation du rayon réfléchi sera :

$$y - y_M = (x - x_M) \text{tg } \gamma.$$

Après substitutions successives de

$$x_M = \frac{1}{m^2} (\rho - mn - \sqrt{\rho^2 - 2mn})$$

$$y_M = \frac{1}{m} (\rho - \sqrt{\rho^2 - 2mn})$$

$$\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} (2\alpha - \beta) = \frac{\operatorname{tg} 2\alpha - \operatorname{tg} \beta}{1 + \operatorname{tg} 2\alpha \operatorname{tg} \beta}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = y'_M = \frac{\rho}{y_M}$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2 \operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha}$$

et en prenant pour paramètre  $y_M = t$ , l'équation se transforme finalement en :

$$0 = f(x, y, t) = y - t - \frac{(2\rho - mt)(\rho^2 m + 2\rho t - mt^2)(x - t^2/2\rho)}{t(\rho^2 m + 2\rho t - mt^2) - 2\rho(\rho^2 - 2\rho t + m^2 t^2)}$$

dont l'enveloppe s'obtiendra en éliminant  $t$  entre  $f = 0$  et  $\delta f/\delta t = 0$ , ce qui, tous calculs (assez longs) faits, conduit aux expressions paramétriques suivantes :

$$x = \frac{1}{2\rho^2} \frac{mt^5 + 3m^2 \rho t^4 - 2m\rho^2 t^3 + (1 + 3m^2)\rho^3 t^2 - 3m\rho^4 t + \rho^5}{(1 + m^2)t^2 + (1 + m^3)\rho^2}$$

$$y = -\frac{m}{2\rho^2} \frac{mt^5 - 3\rho t^4 - 2m\rho^2 t^3 - 2\rho^3 t^2 - 3m\rho^4 t + \rho^5}{(1 + m^2)t^2 + (1 + m^3)\rho^2}$$

(il s'agit, évidemment, d'une courbe unicursale et, à titre de vérification, pour  $m = 0$  on obtient effectivement  $x = \frac{\rho}{2}$  et  $y = 0$ , qui sont les coordonnées du foyer d'un miroir parabolique).

Le pseudo-foyer  $F(x_0, y_0)$ , c'est-à-dire le point de croisement de la caustique, se trouvera sur celui des rayons incidents qui touche le miroir normalement en  $N$  (proposition non démontrée, mais assez intuitive). Or, puisque dans ce cas

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\rho}{t} = -\frac{1}{\operatorname{tg} \beta} = -\frac{1}{m}$$

il s'ensuit que  $t = -m\rho$  et, après simplification et groupement des termes :

$$x_0 = \frac{\rho}{2} \frac{1 + 4m^2 + 5m^4 + 2m^6}{1 + m^2 + m^3 + m^4}$$

$$y_0 = -\frac{\rho}{2} \frac{m(1 + m^2)(1 - m^4)}{1 + m^2 + m^3 + m^4}$$

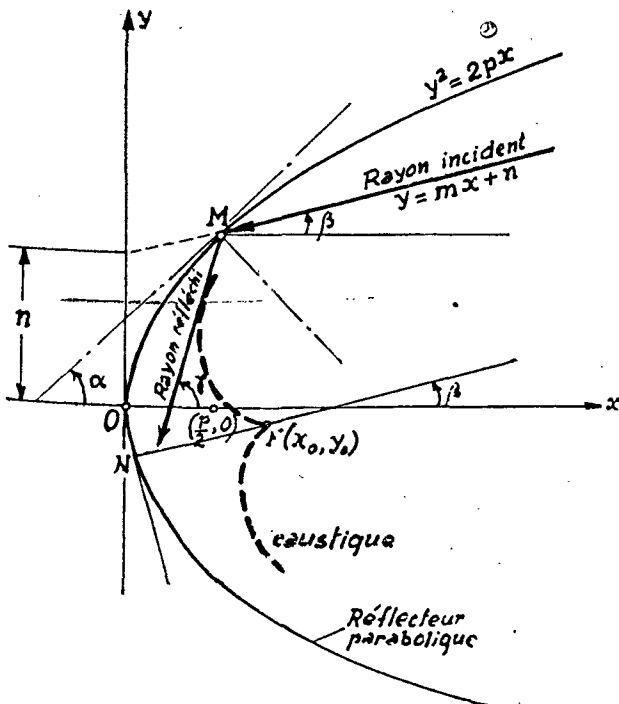


Figure 2

Ainsi, par exemple, pour  $m = 1$  ( $\beta = 45^\circ$ ) il vient :  $x_0 = \frac{\rho}{2}, 3$ ,  $y_0 = 0$ , ce qui montre que, tout en restant sur l'axe  $Ox$ , la distance focale s'est allongée trois fois. Pour de faibles inclinaisons, on peut négliger les termes à partir de  $m^3$  :

$$x_0 \cong \frac{\rho}{2} (1 + 3m^2)$$

$$y_0 \cong -\frac{\rho}{2} \cdot m$$

et l'on voit que, au cours d'une demi-heure, le déplacement du foyer sera de :

$$\operatorname{tg} 7,5^\circ = 0,1315$$

$$x_0 = \frac{\rho}{2} \times 1,052$$

$$y_0 = -\frac{\rho}{2} \times 0,1315$$

c'est-à-dire qu'il aura avancé de 5 p. 100 tout en descendant de 13 p. 100 de la valeur de  $\rho/2$  la distance focale.

Par suite de cet important déplacement de leur foyer, les fours solaires paraboliques doivent obligatoirement suivre le mouvement du soleil et présenter une surface de réflexion aussi parfaite que possible.

#### Solutions intermédiaires

Ces exigences peuvent être sensiblement atténuées lorsque l'application vise des températures moyennes,

de quelques centaines de degrés. C'est ainsi que les réflecteurs cylindro-paraboliques maintes fois cités dans la littérature sur l'énergie solaire pourraient être orientés dans la direction nord-sud et inclinés sur l'horizontale de manière que les rayons solaires tombent perpendiculairement à midi; il suffirait, selon H. Masson (6), d'un réglage azimutal relativement simple pour obtenir un rendement convenable.

Mais indépendamment de la forme plus ou moins simple du réglage, une installation fixe est toujours préférable pour les raisons indiquées plus haut. Le CEMA a étudié et essayé plusieurs solutions, qui n'ont pas donné de résultats satisfaisants et que l'on cite ici simplement pour mémoire :

a) Parabolôide de révolution à axe vertical obtenu par rotation lente d'un liquide réfléchissant (Hg) ou supportant de petits miroirs flottants (ce qui exige un montage héliostatique et une vitesse d'entraînement rigoureusement asservie);

b) Surface de révolution parabolique obtenue par refroidissement centrifugé d'un métal fondu (impossibilité de réaliser une surface convenablement lisse et réfléchissante);

c) Cylindre parabolique fixe, légèrement toroïdal, orienté dans la direction est-ouest (essais à reprendre, résultats incomplets);

d) « Cellule solaire » constituée par un assemblage de miroirs plans rectangulaires concentrant le rayonnement à l'intérieur d'une cavité cylindrique (bonne concentration, en échange d'une grosse dépense en miroirs, d'où la nécessité d'un réglage).

Le CEMA a ensuite entrepris l'étude systématique d'un réflecteur tronconique fixe, en reprenant des idées anciennes (Auguste Mouchot, 1866; A.G. Eneas, 1901; voir aussi Jordan et Ibele (5)) mais en les traitant dans un esprit différent.

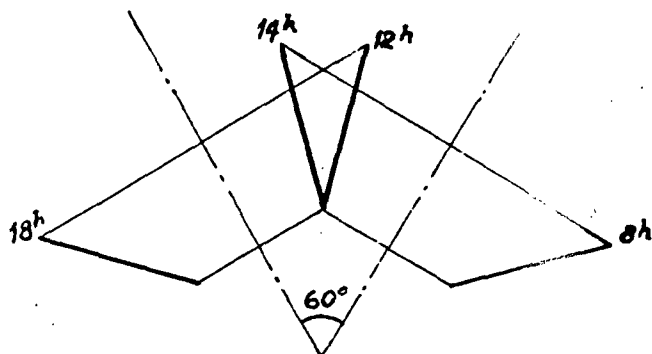


Figure 3

#### Le réflecteur conoïdal

De ces considérations et tentatives diverses découle l'idée d'examiner la possibilité d'un compromis qui consiste à agencer plusieurs surfaces de révolution tronconiques de manière à obtenir, sur un cylindre coaxial intercepteur, une quantité d'énergie suffisante pour assurer un fonctionnement satisfaisant dans un angle de  $90^\circ$ , qui correspond à un écart de trois heures avant et après le moment de l'incidence normale (par exemple de 8 h à 14 h, avec un maximum à 11 h). L'on a surtout développé la solution ayant en vue l'unité frigorifique à absorption décrite plus haut, qui n'exige que quatre heures d'insolation; mais il faut compter aussi avec les heures de ciel couvert, qui, pour la région considérée, auront une probabilité de l'ordre de  $1/3$ , ce qui oblige à augmenter dans une même proportion la durée utile de captation.

Il est à noter tout de suite que dans une région désertique, où la nébulosité n'atteint même pas 3 p. 100 (comme au nord du Chili, où il pleut deux fois par siècle) (7), l'intervalle d'insolation sera limité à la durée strictement nécessaire, afin de laisser

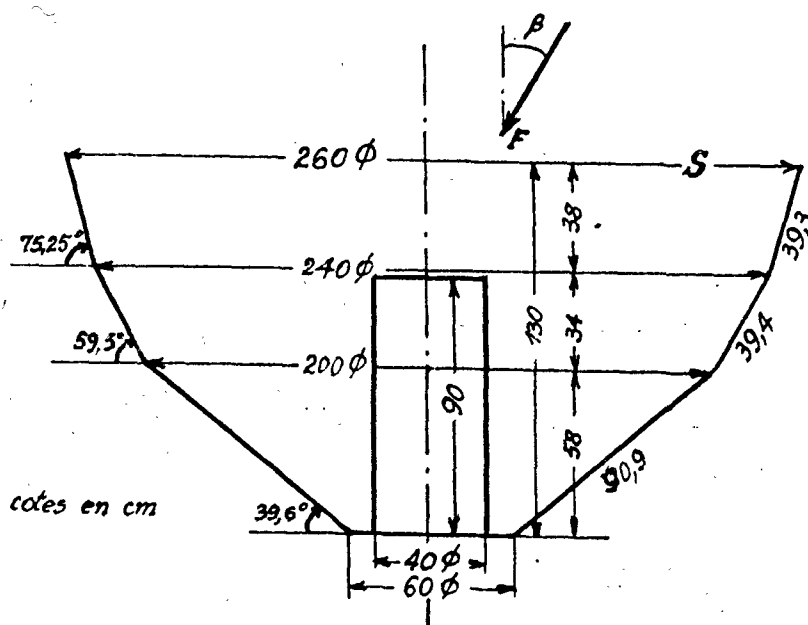


Figure 4

un temps suffisant pour la reconstitution de la solution riche. Par contre, si le réflecteur était destiné à des fins différentes (production de vapeur, séchage, etc.), il serait peut-être opportun d'envisager deux réflecteurs, l'un orienté vers le soleil de 11 h et l'autre vers celui de 15 h (figure 3), avec superposition entre 12 h et 14 h, et fonctionnement ininterrompu de 8 h à 18 h.

Le réflecteur est constitué par trois surfaces tronconiques de 60, 200, 240 et 260 cm de diamètre et  $58 + 34 + 38 = 130$  cm de hauteur totale, inclinées d'environ  $40^\circ$ ,  $60^\circ$  et  $75^\circ$ . Les rayons réfléchis sont interceptés par un cylindre coaxial de 40 cm de diamètre et 90 cm de hauteur (figure 4).

La surface projetée  $S$  représente  $5,30 \text{ m}^2$  (cercle de 2,60 m de diamètre), la superficie réfléchissante totalisée  $9,51 \text{ m}^2$  et le taux de concentration maximum serait de

$$5,30 : (\pi \times 0,4 \times 0,9) = 4,69.$$

$\beta = 45^\circ$	$\cos \beta = 0,707$	$\cos^2 \beta = 0,500$
$30^\circ$	0,866	0,750
$15^\circ$	0,966	0,933
$0^\circ$	1,000	1,000

### Calcul des performances

Il est assez difficile, et d'ailleurs sans grand intérêt pratique, de calculer les performances exactes de ce réflecteur pour une incidence  $\beta$  quelconque, surtout si l'on veut tenir compte des parties ombragées et des réflexions multiples. On peut néanmoins donner une méthode simplifiée de calcul qui permet d'y arriver sans trop de difficultés. Il suffit pour cela de remarquer que :

a) Le faisceau intercepté correspond à  $S \cdot \cos \beta$ ;

b) Le flux incident  $F$  peut être décomposé en un flux vertical  $F \cdot \cos \beta$ , qui sera intégralement renvoyé sur le cylindre (comme on peut facilement s'en rendre compte par simple inspection des rayons réfléchis), et une composante horizontale  $F \cdot \sin \beta$ , qui ne pénétrera pas et, par conséquent, n'agira point.

Dans ces conditions, et au facteur de réflexion près, la surface équivalente, mesurée perpendiculairement aux rayons solaires, est proportionnelle à  $\cos^2 \beta$ , ce qui donne :

$S \cdot \cos^2 \beta = 2,65 \text{ m}^2$	$\varphi S \cdot \cos^2 \beta = 2,25 \text{ m}^2$
3,97	3,37
4,94	4,00
5,30	4,50

soit en moyenne  $\frac{1}{6} (0,500 + 2 \times 0,750 + 2 \times 0,933 + 1,000) = 0,811$  ou  $4,30 \text{ m}^2$  durant les six heures.

En introduisant maintenant un facteur de réflexion  $\varphi = 0,85$  (valeur faible, qui vaut surtout pour des incidences bien éloignées de la normale), on aura les chiffres de la dernière colonne, soit en moyenne  $3,65 \text{ m}^2$  (69 p. 100) de flux normal utile.

La méthode simplifiée de calcul exposée ci-dessus pêche plutôt par défaut, de sorte que les résultats pratiques doivent au moins atteindre les niveaux prévus. Des expériences sont en cours qui semblent confirmer ces précisions sur modèle réduit (échelle

1 : 5) et on est en train d'achever le montage du prototype réel.

La surface réfléchissante a été obtenue grâce à un perfectionnement de la technique de fabrication des miroirs plans, en délayant 15 à 30 g/m<sup>2</sup> de nitrate d'argent sur un support de gélatine, ce qui donne une couche flexible de 1 à 2 microns d'épaisseur qui est ensuite appliquée directement sur feuille d'aluminium et recouverte d'une laque transparente de protection. La figure 5 montre l'aspect relative-

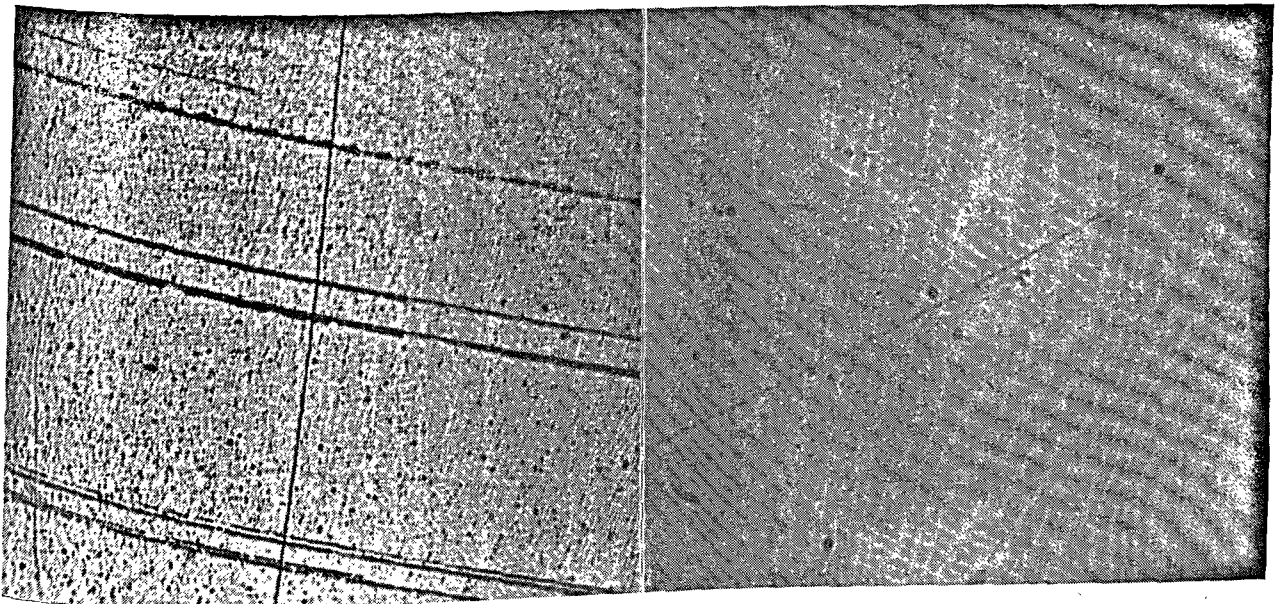


Figure 5. Comparaison entre l'aspect d'une surface réfléchissante de mylar (à gauche) et de Ag (à droite). Augmentation : 70 X

ment continu de cette surface comparativement au mylar.

Le cylindre coaxial intercepteur sera recouvert de noir de fumée ou d'une couche d'oxyde cuprique (surface sélective d'absorption avec faible émission dans l'infrarouge) et entouré d'un cylindre de verre (piège à radiations). La hauteur du cylindre étant inférieure à celle du réflecteur conoïdal, l'effet du vent est éliminé. De plus, le cylindre est percé afin de pouvoir y installer, le cas échéant, un élément chauffant à bois, charbon, gaz ou pétrole.

#### Recherches à poursuivre

Aucune solution n'est parfaite, et le réflecteur conoïdal ne saurait échapper à cette règle. L'inconvénient majeur d'un réflecteur tronconique réside dans le fait que l'échauffement est plus fort à la partie supérieure du cylindre, ce qui retarde le mélange de la solution ammoniacale et risque de créer des stratifications dans le fluide. La disposition adoptée, à cônes multiples, permet de pallier ce défaut sans toutefois l'éliminer complètement.

On pourrait donc se proposer de déterminer une courbe méridienne capable de fournir une distribution homogène du flux réfléchi. En désignant par  $k$  le taux de concentration supposé constant, on écrira

et, par intégration directe

$$\begin{aligned} y &= \frac{1}{kr} \left( \frac{x^2}{2} \pm \int \sqrt{x^2 - k^2 r^2} dx \right) + C \\ &= \frac{x^2}{2kr} \pm \frac{1}{2kr} \left[ x \sqrt{x^2 - k^2 r^2} - k^2 r^2 \ln(x + \sqrt{x^2 - k^2 r^2}) \right] + C \end{aligned}$$

Avec la condition initiale :  $y = 0$  pour  $x = r$ , la solution s'écrit finalement :

$$y = \frac{x^2 - r^2}{2kr} \pm \frac{1}{2k} \left[ x \sqrt{\frac{x^2}{r^2} - k^2} - r \sqrt{1 - k^2} \right] \pm \frac{kr}{2} \ln \frac{\frac{x}{r} + \sqrt{\frac{x^2}{r^2} - k^2}}{1 + \sqrt{1 - k^2}}$$

Mais cette solution, qui est la seule possible théoriquement (avec, toutefois, deux branches tangentes à  $45^\circ$  en  $x = kr$ ), ne convient pas, pour la

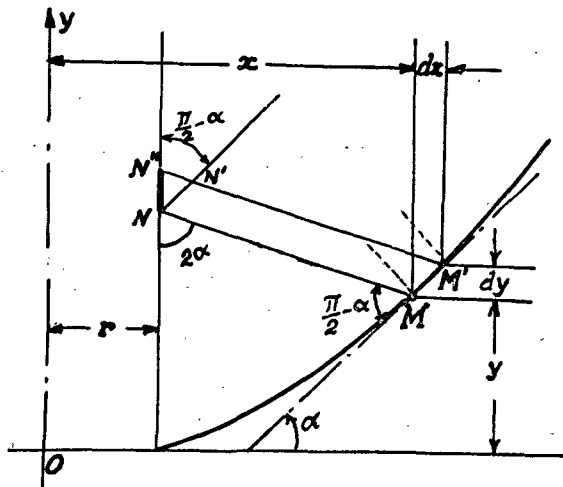


Figure 6

(figure 6) que le flux vertical (en négligeant la composante horizontale  $F \cdot \sin \beta$ ) qui pénètre dans la couronne de rayons  $x$  et  $x + dx$ , se retrouvera, après réflexion en  $M$ , sur un anneau cylindrique  $dz$  de rayon  $r$ , de surface  $k$  fois plus petite :

$$2\pi r dz = \frac{1}{k} 2\pi x dx$$

Il est facile de voir que

$$(NN' || MM') \Rightarrow N'NN'' = \angle N''N'N = \frac{\pi}{2} - \alpha$$

Donc, puisque

$$NN' = MM' = ds, \frac{ds}{2} = dz \sin \frac{2\alpha}{2} = dz \sin \alpha$$

et l'équation ci-dessus devient :

$$kr dz = kr \frac{ds}{2 \sin \alpha} = x dx$$

$$kr \sqrt{dx^2 + dy^2} = 2 \frac{y'}{\sqrt{1 + y'^2}} x dx$$

$$kr(1 + y'^2) = 2y'x,$$

d'où

$$y' = \frac{dy}{dx} = \frac{x \pm \sqrt{x^2 - k^2 r^2}}{kr}$$

simple raison qu'elle n'est pas réelle si  $k > 1$ , c'est-à-dire si on veut réellement concentrer le flux (et il n'est pas intéressant de le diluer encore davantage).

On pourra sans doute choisir une forme différente (tronconique, par exemple) pour la surface interceptrice et chercher une distribution optimale des différents secteurs tronconiques (ce serait un problème de recherche opérationnelle à travers un programme linéaire); on pourra également abandonner la forme de révolution et chercher à étendre l'intervalle d'utilisation en adoptant des sections transversales elliptiques; mais ce sont là des recherches à poursuivre.

#### Conclusions

Les études faites au CEMA, surtout depuis 1958 et avec des ressources assez limitées, montrent qu'on est encore loin d'épuiser toutes les solutions possibles pour mettre l'énergie solaire à l'œuvre afin d'en

extraire toutes sortes de commodités et, en particulier, du froid qui est essentiel à la conservation des aliments.

L'aspect économique est le plus souvent invoqué pour justifier l'absence d'intérêt pratique des recherches de ce genre. Il n'en est rien, et nous avons essayé de démontrer qu'une installation frigorifique solaire pour la conservation des denrées, bien que 20 p. 100 plus chère qu'une armoire frigorifique à groupe hermétique ou à diffusion, s'amortirait complètement au bout de cinq ans, et ceci dans les

conditions économiques brésiliennes où la fabrication industrielle coûte relativement cher et où le prix de l'énergie est resté assez bas.

Il serait donc souhaitable que les Nations Unies constituent un comité permanent pour centraliser et diffuser les résultats obtenus dans les institutions d'études et les laboratoires solaires du monde entier, en stimulant les recherches et en orientant leur spécialisation. C'est un devoir de l'humanité envers les générations futures.

## Références

1. Casati, Pierre, *Energia Solar*, World Power Conference, Rio de Janeiro, 1954.
2. Daniels, Farrington, *Photochemistry in the liquid and solid states* (préparé d'après les mémoires présentés au colloque du 7 septembre 1958), John Wiley & Sons, New York, 1960.
3. Götsche, G. et Pohlmann, W., *Formulaire du Frigoriste* (traduction de la 12<sup>e</sup> éd. allemande), Dunod, Paris, 1951, p. 96.
4. Fajeres, Apolon, Alguns aspectos objetivos de aproveitamento da energia solar no Brasil, *Atas de I Simpósio sobre Energia Solar*, CEMA, Rio de Janeiro, 1959.
5. Jordan, Richard C. et Ibele, Warren, E., Mechanical Energy from Solar Energy, *Proc. of the World Symposium on Applied Solar Energy* (Phoenix, Arizona, 1955). Stanford Research Institute, 1956, p. 96.
6. Masson, H., La conversion de l'énergie solaire, *Acta Electronica*, vol. 3, n° 2, avril 1959, p. 117.
7. Frick, G. et Desvignes, F., Mesures solarimétriques effectuées dans le nord du Chili, *ibid.*, vol. 6.

## Résumé

Une machine frigorifique de fabrication locale, de 9 pieds cubes (environ 255 litres) de volume utile, coûte actuellement au Brésil l'équivalent de quelque 200 dollars et consomme annuellement 600 kWh (1/6 CV pendant 40 p. 100 du temps), soit environ 1 500 cruzeiros ou 8 dollars. Une machine frigorifique à absorption coûterait jusqu'à 20 p. 100 plus cher (collecteur solaire inclus), mais ne consommerait rien, de sorte que la différence s'amortirait au bout de cinq ans. Il n'y a donc pas d'obstacle d'ordre économique à la fabrication industrielle de ces machines (ou plutôt de ces unités frigorifiques, car elles sont exemptes de pièces mobiles), dès que le problème sera convenablement résolu du point de vue technique.

Animé par cette perspective et par les avantages supplémentaires d'une installation solaire (production subsidiaire d'eau chaude, indépendance énergétique, demande de froid proportionnelle à l'insolation), le CEMA a entrepris l'étude d'un prototype fonctionnant à base de  $\text{NH}_3$  en solution ammoniacale et à cycle intermittent. Pendant quatre heures, le générateur, qui contient 80 kg de solution riche à 40 p. 100, s'échauffe à 70 °C et libère 16 kg de  $\text{NH}_3$  à 8 kg/cm<sup>2</sup>. Après séparation des vapeurs d'eau entraînées, on refroidit dans un serpentín extérieur jusqu'à 50 °C (5,2 kg/cm<sup>2</sup>) et on introduit l'ammoniacale dans le condenseur situé à l'intérieur de la chambre froide. Une valve d'expansion fait déboucher le  $\text{NH}_3$  dans l'évaporateur à 3,6 kg/cm<sup>2</sup> et de là les vapeurs, sous 3 kg/cm<sup>2</sup>, sont absorbées par le récipient de solution pauvre qui s'enrichit progressivement. La charge du condenseur est suffisante pour maintenir

le froid pendant 24 heures. Une intercommunication avec le générateur permet en même temps de reconstituer dans celui-ci la solution riche initiale.

Ce cycle, dont la réalisation pratique et le fonctionnement entièrement automatique sont dus à Remigio Franco Lazo, technicien péruvien et collaborateur du CEMA, reçoit l'énergie soit d'une cellule thermique solaire, soit d'un réflecteur conoïdal de 4 à 5 m<sup>2</sup> de surface diamétrale muni également d'une cheminée centrale pour recevoir, le cas échéant, la chaleur d'une source artificielle (bois, gaz, etc.).

On examine ensuite de plus près le problème du concentrateur, après avoir montré que dans les applications industrielles de l'énergie solaire, il est important d'avoir une installation fixe, même si le rendement n'est pas le meilleur possible, car cela en simplifie la construction et l'entretien. Le collecteur plan qui est essentiellement fixe présente en outre l'avantage de recueillir le rayonnement diffusé par les nuages, mais son rendement par ciel couvert est très faible, surtout lorsqu'il s'agit de produire de la vapeur, donc d'assurer des températures bien au-dessus de 100 °C. De plus, lorsqu'on veut l'utiliser pour chauffer la solution ammoniacale, le coût des tuyaux devient prohibitif.

Le collecteur parabolique ou paraboloidal permet d'atteindre, sous incidence directe, des températures assez élevées, mais le foyer se déplace fortement lorsque le faisceau est dévié de quelques degrés à peine. Il s'ensuit que les fours solaires doivent obligatoirement suivre le mouvement du soleil et

présenter une surface de réflexion aussi parfaite que possible. Ces exigences peuvent être sensiblement réduites lorsque l'application vise des températures moyennes de quelques centaines de degrés.

De ces considérations découle l'idée d'examiner les possibilités d'un compromis qui consiste à agencer plusieurs surfaces de révolution tronconiques de manière à obtenir, sur un cylindre coaxial intercepteur, une quantité d'énergie réfléchie suffisante pour assurer un fonctionnement satisfaisant dans un angle de  $90^\circ$ , qui correspond à un écart de trois heures avant et après le moment de l'incidence normale (par exemple de 8 h à 14 h, avec un maximum à 11 h).

Les expériences en cours semblent confirmer les prévisions, au facteur de réflexion près. Un réflecteur constitué par trois surfaces conoïdales de 60, 200, 240 et 260 cm de diamètre et inclinées à  $40^\circ$ ,  $60^\circ$  et  $75^\circ$ , concentre les rayons réfléchis sur un cylindre coaxial de 40 cm de diamètre et de 90 cm de hauteur. La surface projetée représente  $5,30 \text{ m}^2$ , la superficie

réfléchissante est de  $9,51 \text{ m}^2$  (15 à 30 g/m<sup>2</sup> de nitrate d'argent, qui donne une couche de 1 à 2 microns d'épaisseur appliquée directement sur feuille d'aluminium et recouverte d'une laque transparente de protection) et la surface efficace équivalente, mesurée perpendiculairement aux rayons solaires, est de  $2,25 \text{ m}^2$  (42,5 p. 100) à  $45^\circ$ ,  $3,27 \text{ m}^2$  (62,6 p. 100) à  $30^\circ$ ,  $4,00 \text{ m}^2$  (75,5 p. 100) à  $15^\circ$  et  $4,50 \text{ m}^2$  (85 p. 100) à  $0^\circ$ , soit en moyenne  $3,65 \text{ m}^2$  (69 p. 100) durant les six heures, en admettant un facteur de réflexion de 0,85.

On pose ensuite le problème plus général qui est de définir un ensemble de surfaces conoïdales elliptiques réalisant, par un agencement optimal, un réflecteur fixe de rendement acceptable dans un intervalle plus étendu.

L'auteur suggère, en guise de conclusion, la constitution par les Nations Unies d'un comité permanent pour centraliser et diffuser les résultats relatifs aux applications de l'énergie solaire, tout en stimulant les recherches et en orientant leur spécialisation.



## ABSORPTION COOLING UNIT WITH FIXED CONOIDAL REFLECTOR

(Translation of the foregoing paper)

Teodoro Oniga \*

While solar energy is usually regarded as a source of heat, it must not be forgotten that what is really involved is electromagnetic radiation, as Pierre Casal has shown, and that the utilization of this radiant energy may be made particularly effective, avoiding the apparently obligatory passage through the intermediate form of heat, by copying the mechanism of photosynthesis (1, 2).

On the other hand, a heat source may very well serve to pump the heat out of a place and deliver it to the surrounding medium, by creating heat sinks, which are of obvious utility, especially for countries which, like Brazil, receive an abundant supply of infrared photons. There is no secret whatever in the technology of producing cold in this way. But there is the question of competition with secondary solar heat sources in the form of what are called coals (black, or fossil coal, white coal, or water-power, blue coal, or windpower, green coal, or tidal power), and which are available today in concentrations that would be dangerously easy to exploit, if we did not think of the disinheritance of our grandchildren in terms of power resources, which would be the consequence of our present consumption policies. (It is true that we will still leave them the supplementary power represented by the deuterium in the seas, but it would be difficult to transmit the supplementary spiritual resources demanded by Bergson.)

The use of almost all the achievements of science for purposes of military defence has many times been emphasized. Solar energy will be no exception, if we date its systematic utilization from the burning mirrors of Archimedes, defending Syracuse against Marcellus (about 212 B.C.). But its peaceful use is even more ancient, for the Egyptians of the second millenium B.C. were already familiar with the hot-house effect, the principle on which the solar energy collectors of today are based.

### Early development

Frigorific absorption cycles, however, are of relatively recent date. Between 1859 and 1862 François Carré built the first refrigerating machine, using a mixture of water and ammonia (3). The idea of eliminating the pump, unsuccessfully attempted

at the very beginning, in 1899, by the physicist Geppert, was taken up again by the Swedish engineers Platen and Munters, and later by Maiuri, who worked out a machine using the principle of diffusion in hydrogen, as inert gas. Among other industrial developments, the Electro-Lux refrigerator was derived from this machine.

As far back as 1937 there were several attempts (especially in Brazil) to adapt a parabolic reflector to an absorption refrigerator (4). But the work never went beyond the experimental stage, perhaps on account of convenience, or of lack of interest. Today the interval between the birth of an idea in a scientist's dream and its practical development is no longer measured in centuries. It has been shortened to years. We have thus every right to be surprised that progress in the practical applications of solar energy has been so slow. It has certainly not been on account of any contradiction in principle, for developments already exist to demonstrate the entire possibility of extracting from it both heat and cold, mechanical or electrical energy, distilled water or products of photosynthesis, as soon as one takes the trouble of putting that solar energy to work. But, compared to the fabulous sums appropriated for the solution of problems infinitely more complicated, but which are of military interest (a californium bomb is already under discussion, although two years ago only a few thousand atoms of that element had been created), funds are supplied with an eye-dropper to centres trying to develop the applications of solar energy. Idealism is a necessary but not a sufficient condition for progress.

This brings us to the examination, from the strictly economic point of view, of the interest of research of this kind.

### The economic aspect

A compressor refrigerator manufactured in Brazil (the following data are based on 1960 Brazilian prices), with a useful volume of 9 cubic feet (about 255 litres) costs the equivalent of about \$200 and uses 600 kWh a year (1/6 hp, operating 40 per cent of the time, as it does at Rio de Janeiro, for instance, where the mean annual temperature is 25.6°C, with an absolute minimum of 12.8°C), costing 1 500 to 2 000 cruzeiros, or \$8. An absorption refrigerator would be as much as 20 per cent more expensive (solar collector included), but would use no pur-

\* Director, Instituto Nacional de Tecnologia, Centro de Estudos de Mecânica Aplicada, Rio de Janeiro.

chased energy, so that the difference would be amortized in five years. There would thus be no economic obstacle to the industrial production of these machines (or rather, of these refrigerator units, for they have no moving parts), as soon as the problem is satisfactorily solved from the technical point of view.

It is true that absorption refrigerators are normally manufactured only in sizes smaller than 150 dm<sup>3</sup> (5.3 cu ft) capacity, in view of their high consumption of town gas or kerosene. Once the energy cost disappeared, however, there would be nothing to prevent the manufacture of larger units of 7 to 10 cu ft (about 200 to 300 dm<sup>3</sup>).

Besides the purely economic angle, other additional advantages should be pointed out:

Subsidiary production of hot water by means of thermo-siphon circulation of the cooling water of the pre-condenser;

Complete independence from power sources, which would permit installing the comfort of cold in the most isolated, remote or inaccessible places;

The proportional demand for cold is to the amount of sunshine (which is not the case when solar energy is used for heating: sunshine duration is shorter in winter, when the need for heat is greatest, and this leads to oversize plants).

Inspired by these prospects, the CEMA<sup>1</sup> undertook a more detailed study of the problem. The results to date will be the subject of the following chapters of this paper. Chapter 2 is devoted to the study of the internal arrangement of the refrigerating unit, while chapter 3 discusses the harnessing of solar energy by means of a fixed conoidal reflector specially designed for applications of this type. These ideas and results have nothing of the spectacular, but their discussion at the United Nations Conference on New Sources of Energy might suggest practical and co-ordinated means of action with special reference to the under-developed countries.

## The absorption cycle

### *Principle of operation and choice of working fluid*

An absorption machine is a purely thermal machine, that is, the energy required to maintain the process is furnished in the form of heat. The process may be continuous or periodic. The latter is normally adopted in small household installations, on account of its simplicity.

By heating, the refrigerant, which is dissolved in an absorbent, is caused to pass into the gaseous state. After separation from the entrained vapour, the refrigerant is liquefied under the pressure of its own vapour in an air-cooled or water-cooled condenser. The pure liquid so obtained then expands through an expansion valve and passes into the

gaseous state in the evaporator, removing heat from the surroundings in so doing. The vapour is then absorbed in the absorber by the impoverished cooled solution, and is then once again driven out of the enriched liquid.

Ammonia is the refrigerant most suitable for the absorption cycle, for the following reasons: (a) it is highly soluble in water and is readily liberated from water by heat; (b) it is a very common, non-toxic substance; (c) of all commonly available substances, its vapour pressure is the highest; see, for instance, figure 14 of reference 5; (d) its absorption in the infrared is very good, just like that of water.

Pressure-temperature *vs.* concentration curves are given in almost all treatises on thermodynamics and refrigeration. (For convenience, we have plotted a family of iso-p-lines with t°C as abscissa and %NH<sub>3</sub> as ordinate).

### *Description of the refrigerator unit*

Figure 1 is a schematic diagram of the refrigerator unit, essentially comprising:

A generator, consisting of the heating chamber (1), the generator casing (2), the vapor outlet duct (3) and the separator (4);

A two-stage condenser, the first stage (5) being outside the cold chamber (14) and the second stage (7) being inside it; the two stages are separated by the non-return valve (6);

An evaporator (10), preceded by the liquid outlet duct (8) and the expander (9);

An absorber (11), connected to the generator by the constant-pressure valves (12), with an auxiliary coil having the control valve (13);

Finally, the cold chamber (14), which might be, for instance, the interior of the refrigerator itself (15).

The generator (2), which at first contains a rich 40 per cent solution of ammonia in water, receives the solar heat, concentrated either inside it (when a "solar cell" is used or a parabolic concentrator), or outside the cylindrical receiver (which is, in particular, the case when the conoidal reflector described below is used). The NH<sub>3</sub> vapour liberated from the ammonia solution by heating it to 70°C (under 8 atm pressure) passes through the duct (3) into the separator (4), which frees the vapor from the entrained water vapor (the entrained water-vapor content is relatively low, of the order of 1 to 5 per cent, according to the temperature, but it is important to remove it to prevent it from being deposited in the form of ice, which would block the ducts). From the separator, the vapor passes into the coil (5), where its temperature falls to about 50°C, with a corresponding pressure drop to 5.2 atm. The second stage of the condenser (one of the original features of this system) is inside the cold chamber, so that part of the excess cold produced is utilized for condensation, thus eliminating the moving parts (circulating pump, fan).

From the liquid ammonia tank (7), the capillary duct (8) feeds the expander (9), which discharges

<sup>1</sup> The Centre for Studies in Applied Mechanics (CEMA) was organized in 1952 as an affiliate of the National Institute of Technology at Rio de Janeiro. Its research programmes are financed by the National Research Council.

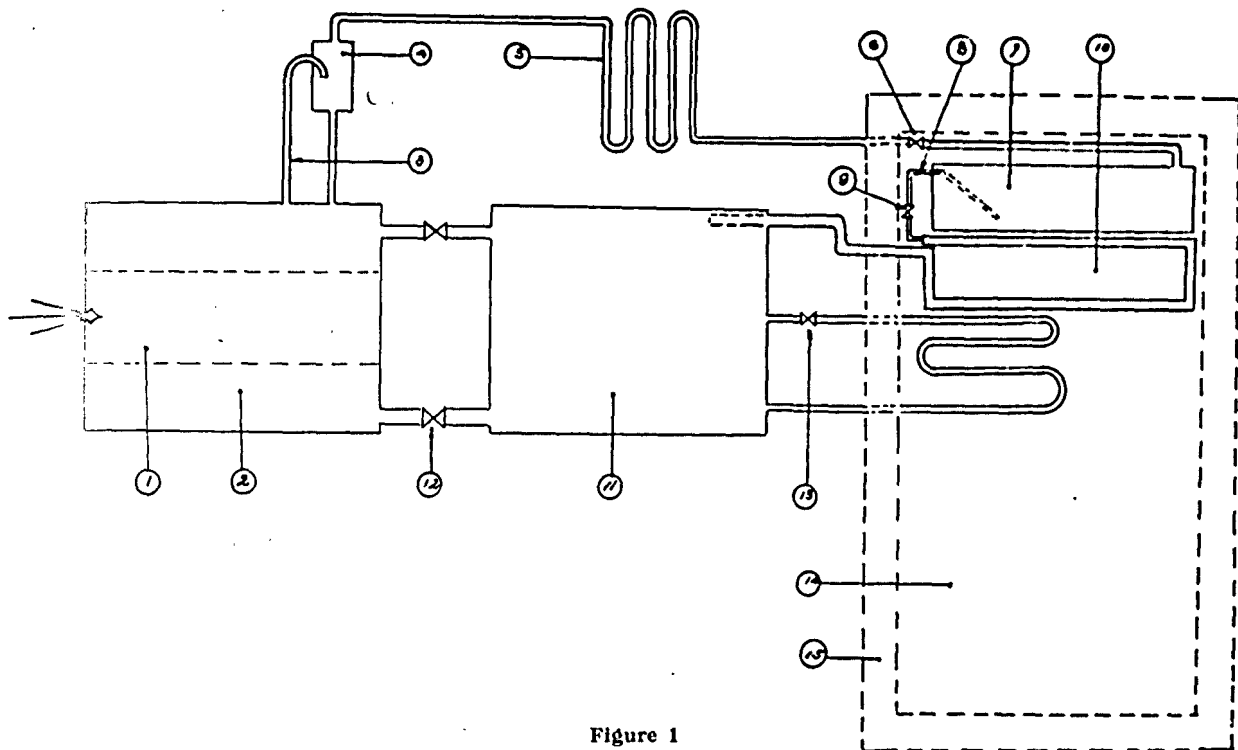


Figure 1

into the evaporator (10), where the pressure is held at around 3.6 atm. In the absorber (11), where the pressure is only 3.0 atm, the vapor is continuously absorbed, thus progressively enriching the solution. The auxiliary coil (13) holds the pressure constant until the pressure in the generator falls below 3 atm. As soon as this level is reached in the generator,  $\text{NH}_3$  will be exchanged through the valves (12), regenerating the rich solution, so that the cycle can recommence. The required heat will be supplied during four hours of exposure to sunshine, and the capacity of the condenser (7) is sufficient to ensure uninterrupted operation for twenty-four hours.

Application has been made for a Brazilian patent on this cycle. Its practical development and its completely automatic operation are due to Remigio Franco Lazo, a Peruvian technologist and staff member of CEMA.

#### Thermodynamic calculations

We start with a refrigerator box having a useful capacity of 9 cubic feet (about 255 litres), or about 12 cubic feet of gross internal volume. This corresponds to a total outside area of about  $4.7 \text{ m}^2$  (dimensions:  $76 \times 72 \times 120 \text{ cm}$ ). Assuming an ambient temperature of  $30^\circ\text{C}$  and an inside temperature of  $-2^\circ\text{C}$ , the hourly loss, with an 8 cm cork insulation, would be  $20 \text{ fg/m}^2\text{h}$ .<sup>2</sup> It follows that the daily loss would be:

$$4.7 \times 20 \times 24 = 2\,256 \text{ fg/day}$$

<sup>2</sup> 1 fg (frigorie) = -1 kcal, or about 3.97 btu/min. It is the French unit of refrigeration.

To refrigerate 40 kg of material of specific heat 0.85 would take

$$40 \times 0.85 (30 - (-2)) = 1\,088 \text{ fg/day}$$

Adding the losses due to frequent opening of the door, which would probably amount to about 20 per cent of the above total, we arrive at a daily consumption of 4 012 fg/day.

1 kg of ammonia produces 305.6 fg when evaporated at  $-5^\circ\text{C}$ . Subtracting the heat of the liquid, held at  $+5^\circ\text{C}$ , and the cold requirements of the second stage of the condenser, or

$$0.5205 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C} [5^\circ - (-5^\circ) + (50^\circ - 5^\circ)] \\ = 28.6 \text{ fg/kg,}$$

and the heating of the absorber, which is of the order of  $1.4^\circ\text{C/h}$  and consumes about 15.6 fg per cycle, the useful cold production that remains will be:

$$305.6 - (28.6 + 15.6) = 261.4 \text{ fg/kg}$$

Thus, to meet the daily consumption of cold, the quantity of ammonia to be circulated would be:

$$4\,012/261.4 = 15.35 \text{ kg of } \text{NH}_3$$

From the initial and final concentrations of ammonia (40 per cent and 25 per cent respectively), we now calculate the total quantity of  $\text{NH}_3$  and water required:

$$\frac{\text{NH}_3}{\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}} = 0.40 \quad \frac{\text{NH}_3 - 15.35}{\text{NH}_3 - 15.35 + \text{H}_2\text{O}} = 0.25$$

whence

$$\text{NH}_3 = 2 \times 15.35 = 30.70 \text{ kg}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 1.5 \times 30.70 = 46.05 \text{ kg}$$

$$\text{Total: } 76.75 \text{ kg of solution}$$

The prototype unit was designed for 32 kg of  $\text{NH}_3$  (16 kg of which were effectively circulated) at 48 kg of water, or a total of 80 kg rich solution in the generator and 64 kg of dilute solution in the absorber at the beginning of the cycle. After 4 h of heating, out of the 16 kg of  $\text{NH}_3$  liberated, 1/6, or 2.67 kg, will have passed into the absorber, and the remainder will have accumulated in the condenser to continue to feed the evaporator during the next 20 h, with a margin of at least 20 per cent when fully charged.

#### Technical details and tests

The heat supplied to the cycle must be sufficient to liberate the 16 kg of  $\text{NH}_3$  and to heat the 80 kg of solution from 30 to 70°C. The heat of vaporization of ammonia at 50°C (average of 30 and 70°C) being of the order of 250 kcal/kg, we shall thus require:

$$Q = 16 \times 250 + (64 \times 1 + 16 \times 0.5205) (70 - 30) \\ = 4000 + 2893 = 6893 \text{ kcal.}$$

With a solar constant of 2 cal/cm<sup>2</sup> min = 1200 kcal/m<sup>2</sup> h, and an average transparency of the atmosphere of 0.75, the incident solar power may be taken at 900 kcal/m<sup>2</sup>h. It follows that at a global collector efficiency of about 60 per cent, its effective surface must be at least:

$$6893 / (4 \times 900 \times 0.60) = 3.19 \text{ m}^2$$

The flat collector does not seem suitable for an application of this kind, in view of the rather high cost of the piping. It would be preferable to use a cylindrical receiver heated by means of the conoidal concentrator to be discussed in the following chapter. For this purpose it would be sufficient to provide a temperature gradient high enough for heat transfer to proceed at the desired rate. A cylinder 40 cm in diameter and 90 cm high (with a useful volume of about 110 litres) has an external heating surface of 1.13 m<sup>2</sup> and transfers 300 kcal/m<sup>2</sup>h°C. It follows that a temperature difference of about

$$6893 / (4 \times 1.13 \times 300) = 5^\circ\text{C}$$

would be sufficient (which would justify the use of a flat collector, were it not for the economic aspect pointed out above).

A simple calculation indicates that the pre-condensation atmospheric exchanger (5) would need an outside surface of about 0.50 m<sup>2</sup>.

The prototype, now in the final stage of assembly, has been built from a second-hand 9 cu ft refrigerator, by removing the sealed unit and modifying the inside arrangements to make room for the accessories mentioned above.

The efficiency will be relatively low, if we take account of the fact that 6893 kcal must be collected to produce at least 4.012 fg (an apparent yield of 58.3 per cent). But, in our opinion, this makes no

difference to the economic analysis above so long as the series manufacturing cost is not more than 20 per cent higher than that of conventional household refrigerators.

### The fixed conoidal reflector

#### The conventional collectors

In the applications of solar energy, especially of those for household use (heating, cooling, water supply), it is important to have a fixed installation, even if the output is not the best possible, for this simplifies both design and maintenance and also provides a good "motivation" for the use of solar equipment. (The setback suffered by solar kitchens in certain regions of India shows that this aspect of the problem is by no means negligible.)

The flat collector offers the immediate advantage of being able to operate with an acceptable output over a long time interval, for the projected area remains greater than 70 per cent of the total collector area when the sun describes a 90° arc (six hours of sunshine). Moreover, the flat collector can also collect the radiation diffused by the clouds, which sometimes reaches 20 per cent of the direct radiation. On the other hand, its yield is rather low for an overcast sky when steam is to be produced, and temperatures over 100°C are thus needed. Hence we have the necessity of providing a concentration ratio of the order of at least 4 or 5, if the boiling point is to be maintained (even though the heat flux that can be drawn off is limited).

This concentration is normally obtained by the aid of a parabolic collector (paraboloid of revolution)

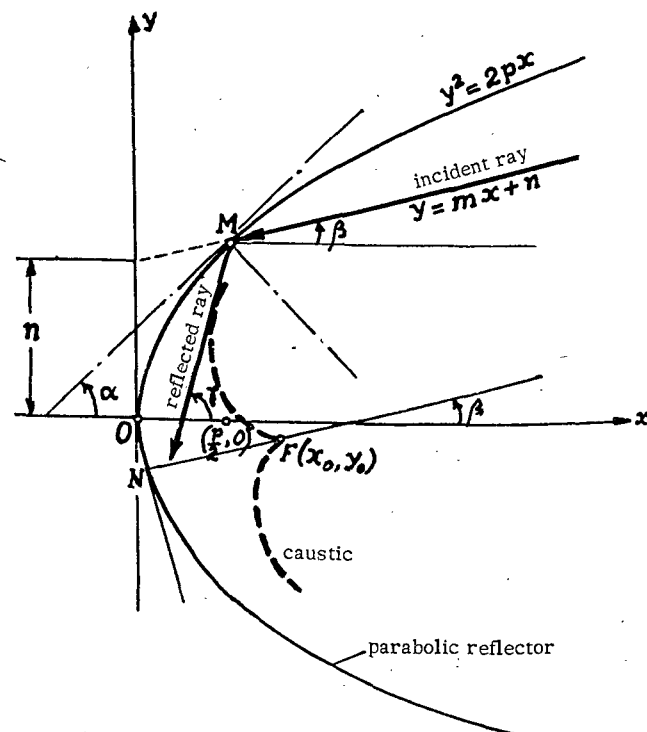


Figure 2

or a paraboloidal collector (parabolic cylinder), which permits the attainment of very high temperatures without direct incidence of radiation—temperatures of the order of 3 000°C or higher for collectors of the former type, and running up to 1 000°C for those of the latter.

#### Displacement of the focus

But the greatest disadvantage of concentrators of this type is, in our opinion, the great displacement of the focus when the incident beam deviates only a few degrees with respect to the axial direction.

This is a fact known from experience, but a more precise analysis may be attempted by seeking the equation of the caustic for any angle of incidence  $\beta$ . The incident ray

$$y = mx + n \quad (m = \tan \beta)$$

meets the parabola  $y^2 = 2px$  at  $M$ , and the equation of the reflected ray will be:

$$y - y_M = (x - x_M) \tan \gamma;$$

After the successive substitutions:

$$x_M = \frac{1}{m^2} (\phi - mn - \sqrt{\phi^2 - 2mn})$$

$$y_M = \frac{1}{m} (\phi - \sqrt{\phi^2 - 2mn})$$

$$\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} (2\alpha - \beta) = \frac{\operatorname{tg} 2\alpha - \operatorname{tg} \beta}{1 + \operatorname{tg} 2\alpha \operatorname{tg} \beta}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = y'_M = \frac{\phi}{y_M}$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2 \operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha}$$

and adopting  $y_M = t$  as parameter the equation is finally transformed into:

$$O = f(x, y, t) = y - t - \frac{2\phi - mt}{t(\phi^2 m + 2\phi t - mt^2)} (x - t^2/2\phi)$$

whose envelope is obtained by eliminating  $t$  between  $f = 0$  and  $\delta f/\delta t = 0$ , which, after performing all the calculations (which are rather tedious), leads to the following parametric expressions:

$$x = \frac{1}{2\phi^2} \frac{m^5 t^5 + 3m^2 \phi t^4 - 2m\phi^2 t^3 + (1 + 3m^2)\phi^3 t^2 - 3m\phi^4 t + \phi^5}{(1 + m^2)t^2 + (1 + m^3)\phi^2}$$

$$y = \frac{m}{2\phi^2} \frac{m^5 t^5 - 3\phi t^4 - 2m\phi^2 t^3 - 2\phi^3 t^2 - 3m\phi^4 t + \phi^5}{(1 + m^2)t^2 + (1 + m^3)\phi^2}$$

(obviously we have a unicursal curve; to verify this, for  $m = 0$  we do get  $x = \phi/2$  and  $y = 0$ , which are the co-ordinates of the focus of a parabolic mirror).

The pseudo-focus ( $F(x_0, y_0)$ ), which is the cusp of the caustic, is found on those of the incident rays that touch the mirror normally at  $N$  (a proposition that has not been demonstrated, but is intuitive enough). But, since in this case

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\phi}{t} = -\frac{1}{\operatorname{tg} \beta} = -\frac{1}{m}$$

it follows that  $t = m\phi$ , and, after simplification and grouping the terms, we get:

$$x_0 = \frac{\phi}{2} \frac{1 + 4m^2 + 5m^4 + 2m^6}{1 + m^2 + m^3 + m^4}$$

$$y_0 = \frac{\phi}{2} \frac{m(1 + m^2)(1 - m^4)}{1 + m^2 + m^3 + m^4}$$

Thus, for instance, for  $m = 1$  ( $\beta = 45^\circ$ ), we have:  $x_0 = \frac{\phi}{2} \cdot 3$ ,  $y_0 = 0$ , which shows that, while still remaining on the axis  $Ox$ , the focal length has lengthened to three times its former value. For low angles of inclination the terms after  $m^3$  may be neglected:

$$x_0 \cong \frac{\phi}{2} (1 + 3m^2)$$

$$y_0 \cong -\frac{\phi}{2} \cdot m$$

and it will be seen that in the course of only half an hour, the displacement of the focus will be:

$$\tan 7.5^\circ = 0.1315$$

$$x_0 = \frac{\phi}{2} \times 1.052$$

$$y_0 = -\frac{\phi}{2} \times 0.1315$$

that is, it will have advanced 5 per cent, and descended 13 per cent of the value of  $\phi/2$ , the focal length.

As a result of this great displacement in focus, parabolic solar furnaces are compelled to follow the motion of the sun and present as perfect a reflecting surface as possible.

#### Intermediate solutions

These requirements may be appreciably relaxed when the application is to moderate temperatures

of several hundred degrees. Thus, the cylindro-parabolic reflectors often mentioned in the literature on solar energy can be oriented due North-South and be inclined to the horizon at such an angle that the solar rays at noon fall on them perpendicularly. According to H. Masson, a relatively simple azimuthal adjustment is sufficient to ensure a satisfactory yield (6).

But, regardless of the more or less simple form of adjustment, a fixed installation is always preferable, for the reasons given above. The CEMA studied and tested several solutions, which did not give satisfactory results and are mentioned here merely for reference.

Paraboloid of revolution with vertical axis, formed by slow rotation of a reflecting liquid (Hg) or by supporting small floating mirrors (requires a heliostatic mount and a rigorously coupled rate of entrainment);

Parabolic surface of revolution obtained by centrifugal cooling of a molten metal (impossible to obtain a surface of suitable polish and reflecting power);

Fixed parabolic cylinder, slightly toroidal, oriented East-West (tests to be resumed, results incomplete);

"Solar cell" comprising an assembly of mirrors concentrating the radiation in the interior of a cylindrical cavity (good concentration, at a high cost for mirrors, which makes it necessary to have an adjusting mechanism).

After these studies and tests, the CEMA then took up the systematic study of a fixed reflector in the shape of a truncated cone, reviving old ideas (August Mouchot, 1866; A. G. Eneas, 1901; see also reference 5), but treating them in a different spirit.

#### The conoidal reflector

Out of these varied thoughts and attempts there evolves the idea of examining the possibility of a compromise, by so disposing several truncated conical surfaces of revolution as to obtain, on a coaxial intercepting cylinder, a quantity of energy sufficient to ensure satisfactory operation over a 90° angle, corresponding to a difference of 3 h before and after the time of normal incidence (for instance, from 8 h to 14 h, with a maximum of 11 h). The solution was developed primarily for use in the absorption refrigerator unit, which requires only four hours of sunshine; but one must also reckon with the hours of overcast, which, for the region under consideration, have a probability of the order of  $\frac{1}{3}$ , making it necessary to increase the useful duration of energy collection in the same proportion.

$\beta = 45^\circ$	$\cos \beta = 0.707$	$\cos^2 \beta = 0.500$	$S \cdot \cos^2 \beta = 2.65 \text{ m}^2$	$\phi S \cdot \cos^2 \beta = 2.25 \text{ m}^2$
30°	0.866	0.750	3.97	3.37
15°	0.966	0.933	4.94	4.00
0°	1.000	1.000	5.30	4.50

or, on the average  $\frac{1}{6} (0.500 + 2 \times 0.750 + 2 \times 0.933 + 1.000) = 0.811$

or 4.30 m<sup>2</sup> in the six hours.

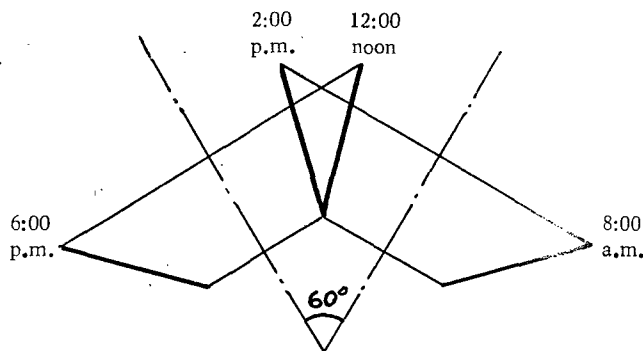


Figure 3

It should be noted at once that in a desert region, where the cloudiness does not even reach the 3 per cent level (as is the case in Northern Chile, where it rains twice a century) (7) the duration of exposure to sunshine will be limited to what is strictly necessary, to leave sufficient time for the regeneration of the rich solution. On the other hand, if the reflector is intended for other purposes (steam production generation, drying, etc.), it would perhaps be appropriate to provide a pair of reflectors, one oriented towards the sun's 11 h position, and the other towards its 15 h position (figure 3), with superposition between 12 and 14 h and uninterrupted operation from 8 to 18 h.

The projected area  $S$  is 5.30 m<sup>2</sup> (circle 2.60 m in diameter). The reflecting surface is 9.51 m<sup>2</sup>, and the maximum concentration ratio will be

$$5.30/(\pi \times 0.4 \times 0.9) = 4.69$$

#### Performance calculation

It is very difficult, and devoid of much practical interest, to calculate the exact performance of this reflector for any given angle of incidence  $\beta$ , especially if account is to be taken of the shaded portions and of the multiple reflections. A simplified method of calculation, involving little trouble, may nevertheless be given. It will suffice, for this, to note that:

(a) The interception beam corresponds to  $S \cos \beta$ .

(b) The incident flux  $F$  may be decomposed into a vertical flux  $F \cos \beta$  all of which will be reflected on to the cylinder (as will be readily seen by a simple inspection of the reflected rays), and a horizontal component  $F \sin \beta$ , which will not penetrate at all, and consequently will have no effect.

Under these conditions, at the reflection factor adopted, the equivalent area, measured perpendicularly to the solar rays, is proportional to  $\cos^2 \beta$ , which gives:

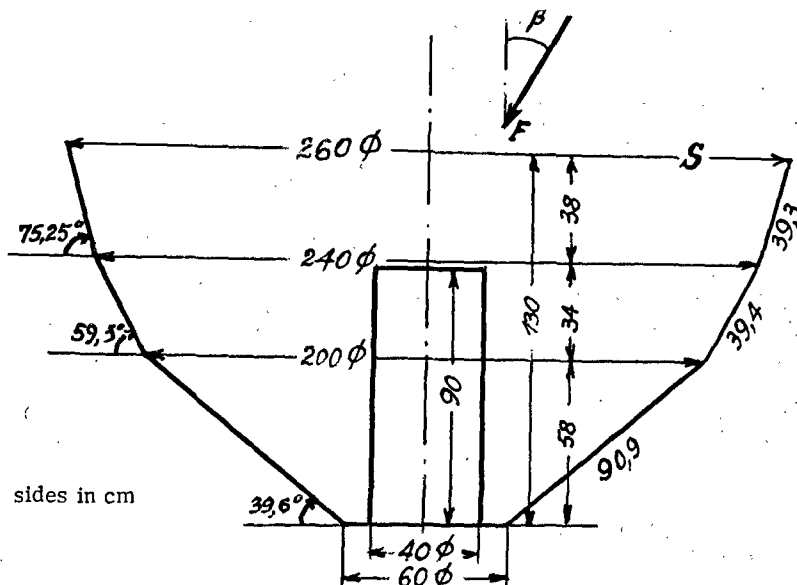


Figure 4. The reflector consists of three truncated conical surfaces, 60, 200, 240 and 260 cm in diameter, and  $58 + 34 + 38 = 130$  cm in total height, inclined about  $40^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $75^\circ$ . The reflected rays are intercepted by a coaxial cylinder 40 cm in diameter and 90 cm high

If we now introduce the reflection factor  $\varphi = 0.85$  (a small quantity, applying primarily to angles of incidence rather far from the normal direction), we get the figures of the last column, or an average of  $3.65 \text{ m}^2$  (69 per cent) of the normal useful flux.

This simplified method of calculation tends to give low results, so that the practical results should at least reach the predicted levels. Experiments now in progress appear to confirm predictions on a scale model (1 : 5) and the assembly of the actual prototype is now nearing completion.

The reflecting surface was obtained by an improved method of making plane mirrors by mixing 15 to  $30 \text{ g/m}^2$  of silver nitrate with a gelatine support, yielding a flexible layer 1 to 2 microns thick which is then directly applied to aluminium sheet and covered with a transparent protective varnish. Figure 5 shows the relatively continuous appearance of this surface, as compared with mylar.

The intercepting coaxial cylinder will be covered with lampblack or with a layer of cupric oxide (surface with selective absorption and low emission

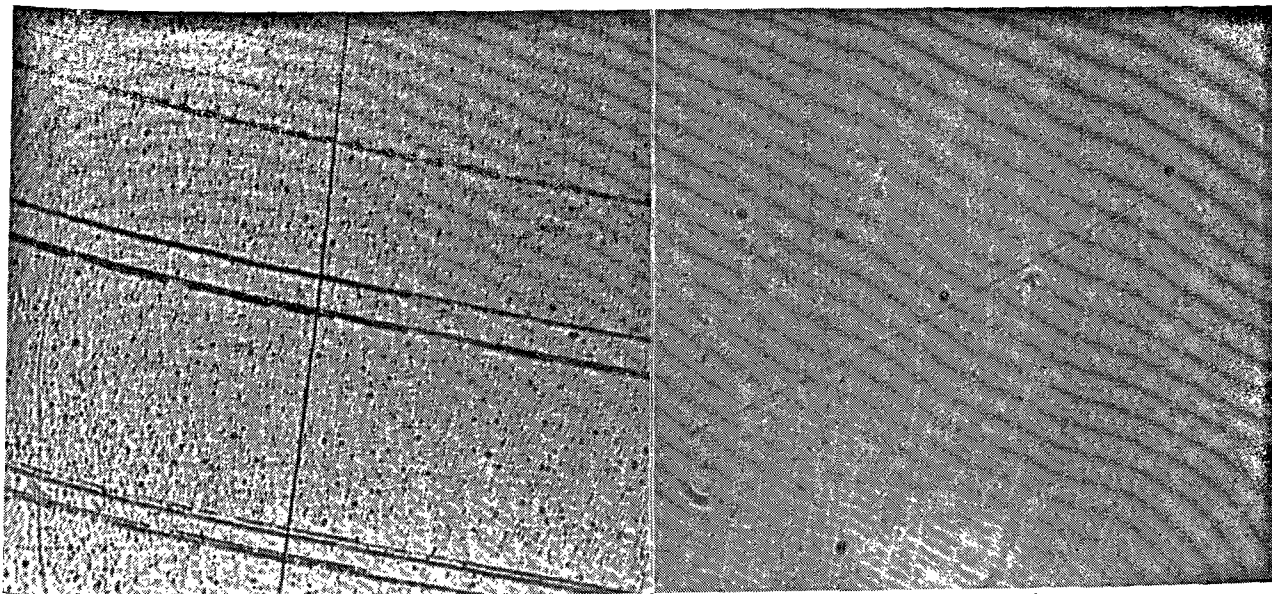


Figure 5. Comparison of the appearance of a mylar reflecting surface (left) and that of a silver surface (right); magnification 70 X

in the infrared) and surrounded by a glass cylinder (radiation trap). The height of the cylinder being lower than that of the conoidal reflector, the effect of the wind is eliminated. The cylinder is pierced for installation, if desired, of a heating unit burning wood, coal, gas or oil.

*Future research*

No solution is perfect. The conoidal reflector is no exception to this rule. The major disadvantage of a truncated conical reflector resides in the fact that the heating is stronger on the upper part of the cylinder, which slows the mixing of the ammonia solution and may cause stratification in the liquid. The arrangement adopted, using multiple cones, alleviates this shortcoming without completely eliminating it.

One may thus propose to determine a meridional curve able to provide a homogeneous distribution of the reflected flux. If  $k$  is the concentration ratio, assumed constant, we shall write (figure 6) that the vertical flux (neglecting the horizontal component  $F \sin \beta$ ) penetrating in the annulus of radii  $x$  and

$x + dx$ , will fall, after reflection at  $M$ , on a cylindrical ring element  $dz$  of radius  $r$ , and  $k$  times smaller in area:

$$2 \pi r dz = \frac{1}{k} 2 \pi x dx$$

It is easy to see that

$$(NN' \parallel MM') \angle N'NN'' = \angle N''N'N = \frac{\pi}{2} - \alpha$$

Hence, since

$$NN' = MM' = ds, ds/2 = dz \sin(2\alpha/2) = dz \sin \alpha$$

and the above equation becomes :

$$kr dz = kr \frac{ds}{2 \sin \alpha} = x dx$$

$$kr \sqrt{dx^2 + dy^2} = 2 \frac{y'}{\sqrt{1 + y'^2}} x dx$$

$$kr (1 - y'^2) = 2 y' x,$$

whence

$$y' = \frac{dy}{dx} = \frac{x \pm \sqrt{x^2 - k^2 r^2}}{kr}$$

and, by direct integration,

$$y = \frac{1}{kr} \left( \frac{x^2}{2} \pm \int \sqrt{x^2 - k^2 r^2} dx \right) + C$$

$$= \frac{x^2}{2kr} \pm \frac{1}{2kr} \left[ x \sqrt{x^2 - k^2 r^2} - k^2 r^2 \ln(x + \sqrt{x^2 - k^2 r^2}) \right] + C$$

as follows :

$$y = \frac{x^2 - r^2}{2kr} \pm \frac{1}{2k} \left[ x \sqrt{\frac{x^2}{r^2} - k^2} - r \sqrt{1 - k^2} \right] \pm \frac{kr}{2} \ln \frac{\frac{x}{r} + \sqrt{\frac{x^2}{r^2} - k^2}}{1 + \sqrt{1 - k^2}}$$

But this equation, which is the only one theoretically possible (however, with two branches tangent at  $45^\circ$  at  $x = kr$ ) is unsuitable, for the simple reason that it is only real if  $k > 1$ , that is to say, if one wants really to concentrate the flux (and there is certainly no point in diluting it again).

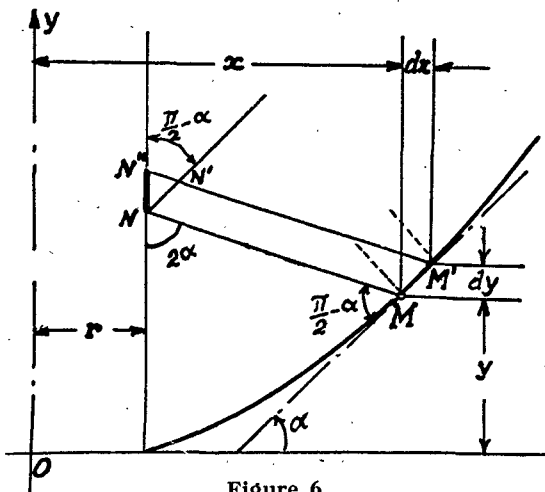


Figure 6

A different shape could doubtless be selected for the intercepting surface (that of a truncated cone, for instance), and seek an optimum distribution of the various truncated-conic sectors (this would be a problem of operational research on a linear programme); and one could also abandon the surface of revolution and seek to extend to interval of utilization by adopting transverse ellipse sections; but these are lines of research to be followed.

**Conclusions**

The studies conducted at CEMA, mainly since 1958 and with rather limited resources, show that we are still far from exhausting all the possible solutions for harnessing solar energy to extract conveniences of all kinds, especially cold, which is essential for food storage.

The economic aspect is most often invoked to prove that research of this kind is not of practical interest. This is not true at all, and we have tried to demonstrate that a solar refrigerator for food storage, even though it is 20 per cent more expensive



than a refrigerator with a sealed unit or of the diffusion type, would pay for the 20 per cent excess cost completely in five years, and this under the economic conditions of Brazil, where manufacturing is relatively expensive and the cost of energy has remained fairly low.

It would therefore be desirable for the United Nations to establish a permanent committee to centralize and distribute the results obtained at the solar research institutes and laboratories of the world, stimulating and orienting research. This is a duty of humanity to generations yet to come.

### References

1. Casal Pierre, Solar Energy. World Power Conference, Rio de Janeiro, 1954.
2. Daniels, Farrington, editor, Photochemistry in the liquid and solid states (based on papers presented at a symposium held 3-7 September 1958). Wiley, New York, 1960.
3. Göttsche, G. and Pohlmann, W., *Refrigeration Manual* (translated from the 12th German edition). Dunod, Paris, 1951, p. 96.
4. Fanzanes, Apolon, Some objective aspects of the utilization of solar energy in Brazil. In: *Trans. I Symposium on Solar Energy CEMA*, Rio de Janeiro, 1959.
5. Jordan, Richard C. and Ibele, Warren E., Mechanical Energy from Solar Energy. In: *Proc. World Symp. on Applied Solar Energy*, Phoenix, Arizona, 1955. Stanford Research Institute, 1956, p. 96.
6. Masson, H., The conversion of solar energy. *Acta Electronica* 3 (2):117, April 1959.
7. Frick, G., and Desvignes, F., Solarimetric measurements in Northern Chile. See reference 6.

### Summary

A 9 cu ft (225 litre) refrigerator made in Brazil costs the equivalent of \$US200 there, and uses 600 kWh a year ( $\frac{1}{8}$  hp, operating 40 per cent of the time). The cost of this energy is about 1 500 cruzeiros, or \$8. A solar-energy absorption refrigerating unit (including the solar collector) would cost about 20 per cent more, but the absence of any charge for the energy would make up this initial difference in about five years. Once the technical problems are solved, there will be no economic reason why these units should not be manufactured.

Impressed by the prospects and by the additional advantages of solar refrigerators (water heating, independence from conventional power sources and the fact that the demand for cold varies seasonally with isolation), the CEMA has studied a prototype operating on an intermittent cycle, using ammonia and water. The generator contains 80 kg of 40 per cent rich solution, which, when heated four hours, reaches a temperature of 70°C and liberates 16 kg of ammonia at a pressure of 8 kg/cm<sup>2</sup>. After separation of the entrained water vapour, the ammonia is cooled to 50°C (5.2 kg/cm<sup>2</sup>) in an outside coil, whence it passes to the condenser, inside the cold chamber. Hence it passes through an expansion valve into the evaporator at 3.6 kg/cm<sup>2</sup>, and from there into the absorber, containing impoverished solution, which becomes progressively enriched. The condenser charge is sufficient to maintain the cold for twenty-four hours. By means of an interconnexion with the generator, the initial rich solution is regenerated in it.

The practical development and operation of this cycle are entirely due to Remigio Franco Lazo, a Peruvian technologist and staff member of CEMA. It receives its energy either from a solar thermal cell or from a conoidal reflector 4 to 5 m<sup>2</sup> in area,

with a central chimney for auxiliary heating, if necessary, by wood, gas, etc.

The problem of the concentrator is then discussed in greater detail, after showing that a fixed installation is important in the industrial applications of solar energy, even if the yield is not the maximum attainable, for this simplifies design and maintenance. The flat collector, which is essentially fixed, also has the advantage of collecting the radiation diffused by the clouds, but its output under an overcast sky is very low, especially for steam generation, that is, for providing temperatures over 100°C. Moreover, to use it to heat the ammonia solution would require piping at prohibitive cost.

The parabolic or paraboloidal collector gives very high temperatures under direct incidence, but the focus is sharply displaced when the beam deviates only a few degrees. It follows that solar furnaces must necessarily follow the sun and have a reflecting surface as perfect as possible. These requirements may be appreciably relaxed for applications requiring only moderate temperatures of several hundred degrees.

These considerations give rise to the idea of examining a possible compromise, by arranging several surfaces of revolution in such a way as to obtain, on a coaxial intercepting cylinder, a quantity of reflected energy sufficient for satisfactory operation over an angle of 90°, corresponding to an interval of three hours before and after the time of normal incidence (for instance from 8 h to 14 h, with a maximum at 11 h).

Experiments now in progress confirm the predictions, except for the reflection factor. A reflector consisting of three conoidal surfaces 60, 200, 240

and 260 cm in diameter, inclined  $40^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $75^\circ$ , concentrates the reflected rays on to a coaxial cylinder 40 cm in diameter and 90 cm high. The area projected is  $5.30 \text{ m}^2$ , and the reflecting surface is  $9.51 \text{ m}^2$  (15 to  $30 \text{ g/m}^2$  of silver nitrate, giving a layer 1 to 2 microns thick, applied directly to aluminium sheet and covered by a transparent protective varnish), and the effective equivalent area, measured perpendicularly to the solar rays, is  $2.25 \text{ m}^2$  (42.5 per cent) at  $45^\circ$  inclination,  $3.37 \text{ m}^2$  (63.6 per cent) at  $30^\circ$ ,  $4.00 \text{ m}^2$  (75.5 per cent) at  $15^\circ$ , and  $4.50 \text{ m}^2$  (85 per cent) at  $0^\circ$ , or an average of  $3.65 \text{ m}^2$  (69 per

cent) for the six-hour period, assuming a reflection factor of 0.85.

A more general problem is then posed: to define a set of elliptical conoidal surfaces such as to give a fixed reflector of satisfactory yield and optimum efficiency over a more extensive interval.

The author suggests in conclusion that the United Nations establish a permanent committee to centralize and diffuse the results of research on applications of solar energy, stimulate investigation, and provide orientation for its specialized development.

## BILAN ÉCONOMIQUE DE LA FABRICATION DE GLACE AVEC UN APPAREIL A ABSORPTION UTILISANT LE SOLEIL COMME MOYEN DE CHAUFFAGE

F. Trombe et M. Foëx \*

Dans la plus grande partie des zones arides, au voisinage des tropiques, règne en général un climat chaud et sec accompagné d'un ensoleillement le plus souvent intense et régulier. Dans ces zones, pour la plupart encore actuellement privées d'énergie, la production de froid, à l'aide du rayonnement solaire, peut présenter un intérêt exceptionnel. Diverses recherches et mises au point ont déjà été faites dans ce sens; en particulier V. A. Baum, à Tachkent (Uzbékistan, URSS), a construit un ensemble de réfrigérateurs solaires produisant 250 kg de glace par jour (1, 2). La vapeur nécessaire au fonctionnement du réfrigérateur proprement dit est produite par une chaudière placée au foyer d'un grand miroir parabolique orienté constamment vers le soleil.

Nous nous sommes proposé, au Laboratoire de l'énergie solaire de Mont-Louis, de réaliser un réfrigérateur fonctionnant à l'aide d'un cycle ammoniacal intermittent, la solution ammoniacale étant directement chauffée dans la zone de concentration du rayonnement solaire. Un tel cycle s'adapte bien à l'utilisation des rayons du soleil. La solution ammoniacale est chauffée pendant l'ensoleillement et donne du gaz ammoniac sous pression qui se liquéfie. Le froid (distillation et redissolution du gaz ammoniac) est produit après le coucher du soleil et pendant la nuit.

### Description de l'appareil (3, 4)

L'appareil, entièrement soudé en acier, comporte les différentes parties suivantes (figure 1) :

a) Une cuve réserve A, complètement remplie de solution ammoniacale et qui doit rester froide. La partie supérieure de cette cuve contient, pendant les différentes phases de fonctionnement, des solutions plus riches en ammoniaque que celle qui se trouve dans la partie inférieure. Cette superposition peut être stable, les solutions pauvres étant plus denses que les solutions riches;

b) Un échangeur de température B formé de tubes concentriques;

c) Un tube de chauffage C sur lequel l'énergie solaire est concentrée au moyen d'un miroir cylindro-parabolique en alliage aluminium-magnésium

(3 p. 100 magnésium), brillanté par oxydation anodique et appelé brillalumag. Le miroir a une distance focale de 25 cm et une ouverture voisine de 4; il peut tourner autour de son axe focal, de direction est-ouest, au moyen de supports métalliques circulaires, de manière à réaliser l'inclinaison la plus favorable à une bonne concentration de l'énergie sur le tube. Un réglage par jour suffit au voisinage des équinoxes; cinq ou six réglages sont nécessaires au moment des solstices;

d) Un bouilleur D contenant assez de liquide pour permettre la distillation de la quantité de gaz ammoniac susceptible d'être produite au cours d'une journée;

e) Un condenseur E refroidi par une réserve d'eau F non renouvelable, placée dans une cuve protégée contre l'action du rayonnement solaire par un revêtement convenable; ce revêtement devant, en outre, permettre le refroidissement nocturne de l'eau;

f) Une réserve d'ammoniaque liquide H, surmontée d'un serpentin G et communiquant avec un autre

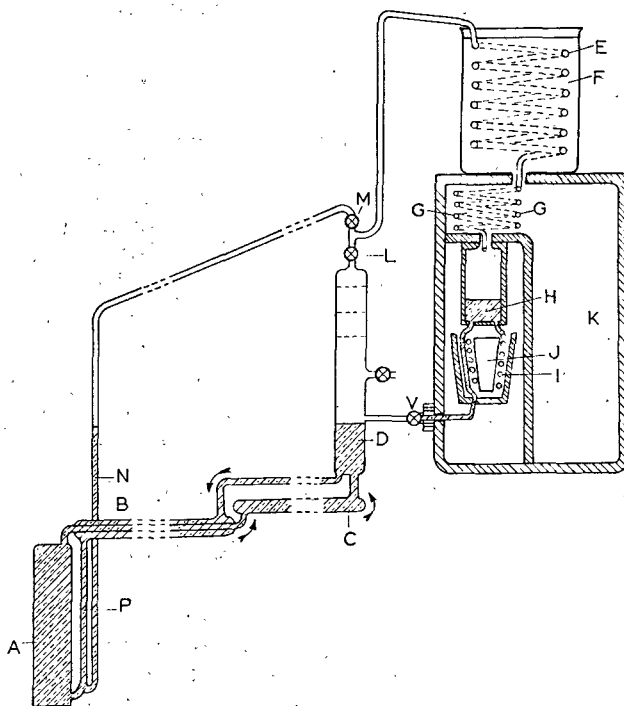


Figure 1

\* Laboratoire de l'énergie solaire du Centre national de la recherche scientifique, Mont-Louis, Pyrénées-Orientales, France.

serpentin I entourant un bac à glace J; l'ensemble est contenu dans une chambre froide K;

g) Des vannes ou des clapets L et M permettant de réaliser, de jour, la distillation de l'ammoniac, de nuit, sa réabsorption dans la solution ammoniacale appauvrie pendant la journée;

h) Une vanne V pour la purge à la fin de la période de réfrigération des résidus liquides de l'évaporateur I.

Pendant le chauffage, la vanne L est ouverte et la vanne M fermée. La circulation de la solution ammoniacale est assurée par le dégagement de bulles de gaz ammoniac, au niveau du tube C et jusqu'au bouilleur D. Le liquide chaud appauvri venant de ce dernier échange ses calories avec le liquide froid, aspiré à la partie supérieure de la réserve, puis rejoint le fond de cette même réserve. Le gaz ammoniac dégagé passe par le condenseur où il se liquéfie et rejoint, à travers le serpentin G, la réserve H et le serpentin I.

Pour la production de froid, après suppression ou disparition du chauffage solaire, la vanne M est ouverte et la vanne L fermée. L'aspiration du gaz ammoniac due au refroidissement du bouilleur D s'effectue par les tubes N et O. Le mélange liquide-gaz dans le tube O assure la circulation générale des solutions ammoniacales dans le sens des flèches. Le refroidissement du bouilleur est, de ce fait, accéléré et la pression baisse, provoquant la distillation du gaz ammoniac. Cette distillation a lieu, au début dans l'ensemble serpentin I — réservoir H, mais ce dernier étant calorifugé, sa température s'abaisse et la consommation de frigories a lieu, par la suite, uniquement au niveau du serpentin I. La vitesse de distillation est fonction, d'une part, de la vitesse de refroidissement des solutions ammoniacales et, d'autre part, des apports thermiques sur le serpentin I.

Les avantages de l'appareil précédent sont les suivants :

a) Une faible inertie. En effet, en dehors d'une courte période initiale nécessaire au chauffage du tube chauffant, du bouilleur et de la solution ammoniacale qui y est contenue, on ne consomme pratiquement que l'énergie nécessaire à la distillation du gaz ammoniac, les calories fournies en dehors des précédentes étant récupérées pour la plus grande part dans l'échangeur;

b) Une efficacité de réfrigération évoluant peu du début à la fin de l'absorption, le gaz dégagé rencontrant toujours les solutions les plus pauvres;

c) Une différence peu élevée entre les températures d'absorption et de distillation; ce résultat est obtenu grâce aux bonnes conditions de l'absorption et à la présence d'une réserve froide, dont l'importance relative peut être choisie;

d) L'absence totale de pompes destinées à faire circuler la solution ammoniacale, ou à tout autre usage. L'appareil fonctionne uniquement au moyen de l'énergie solaire, sans aucun autre apport d'énergie, en particulier sans le secours de l'électricité;

e) Une réfrigération ne comportant pas de renouvellement de la masse d'eau utilisée, condition indispensable dans les pays arides, où cette dernière est rare.

## Résultats

Les essais ont été faits avec un appareil de 1,5 m<sup>2</sup> de surface captante de l'énergie solaire et un autre de 18 m<sup>2</sup> (4). On obtient respectivement 6 kg et 95 kg de glace par jour, pour une durée réelle de distillation du gaz ammoniac de 4½ à 5 heures, sans compter la période de préchauffage qui est de l'ordre de 1 h ½.

Le rendement énergétique, meilleur pour l'appareil de 18 m<sup>2</sup> que pour celui de 1,5 m<sup>2</sup> semble encore pouvoir être notablement amélioré.

## Améliorations envisagées

Les recherches sont poursuivies actuellement dans diverses voies :

a) Diminution du prix de revient des surfaces réfléchissantes;

b) Comparaison des installations à miroir parabolique est-ouest et à miroir tournant autour de l'axe du monde;

c) Comparaison des installations à miroirs cylindro-paraboliques et paraboloides couplés avec des orienteurs;

d) Allègement de l'ensemble du circuit ammoniacal;

e) Étude des rendements pour diverses températures des sources chaudes et froides lors de la distillation diurne (production de NH<sub>3</sub> liquide);

f) Étude des rendements en fonction de la température de la distillation nocturne (production de glace ou refroidissement de locaux sans production de glace);

g) Étude de prototypes plus puissants donnant de 100 à 500 kg de glace par jour.

## Étude du prix de revient de la glace produite avec l'appareil de 18 m<sup>2</sup>

Le prix du modèle actuel (18 m<sup>2</sup>) est de l'ordre de deux millions d'anciens francs (soit 20 000 NF); bien que ce prix puisse être notablement baissé, nous l'adoptons comme base. L'amortissement de l'appareil, 10 p. 100, est donc de 200 000 anciens francs par an. La production annuelle de glace est de :

28 500 kg pour 300 jours d'ensoleillement;

23 500 kg pour 250 jours;

19 000 kg pour 200 jours.

Les prix du kilo de glace seront respectivement (en anciens francs) : 7, 8, 50 et 10,50. La main-d'œuvre nécessaire pour le fonctionnement des appareils n'est pas comptée; elle serait proportionnellement très onéreuse pour le fonctionnement d'une seule

Tableau 1. Prix de la glace dans divers pays

	Gros (usine)	Détail	Prix en nouveaux francs	
			Gros (100 kg)	Détail (100 kg)
<i>Europe</i>				
Belgique . . . . .	Barre de 25 kg : 15 francs belges	Barre de 25 kg : 24 francs belges		5,9 (usine) 9,4 (domicile)
Danemark . . . . .	La tonne : 80 couronnes danoises	La tonne : 104 couronnes danoises (rabais sur les prix indiqués pour une grande consommation annuelle)	5,6 (usine)	7,3 (domicile)
50 t . . . . .	0,75 couronnes danoises	1,50 couronnes danoises		
25 t . . . . .	1,00 couronnes danoises	2,00 couronnes danoises		
50 t . . . . .	1,25 couronnes danoises	2,50 couronnes danoises		
100 t . . . . .	1,50 couronnes danoises	3,00 couronnes danoises		
150 t . . . . .	2,00 couronnes danoises	4,00 couronnes danoises		
20 t + . . . . .	2,50 couronnes danoises	5,00 couronnes danoises		
Grande-Bretagne . .	La tonne : £ 4	La tonne : £ 4/10	£ 0/6/2	
Grèce (Salonique) . .	Barre de 25 kg : 3,80 drachmes (non taxée)	Barre de 25 kg : 6,10 drachmes	2,9	4,03
	Barre de 25 kg : 4,40 drachmes (taxée)			
Hongrie	Les 100 kg :	Les 100 kg :		
(Bouapest) . . . . .	14,50 forints	16 forints		
(Bouwince) . . . . .	16 forints			
Italie . . . . .	Les 100 kg : 440 litres	Les 100 kg : 680 litres	3,4	5,3
Pays-Bas . . . . .	Barre de 25 kg : 0,56 florins La tonne : 20 florins (pêche) Barre de 25 kg : 0,60 à 0,80 florins (C.A.F. pour industries chimiques)	Barre de 25 kg : 1,10 florins	2,9 à 3,9	5,9
Yougoslavie . . . . .	La tonne : 4 000 dinars	La tonne : 6 300 dinars	3,1 à 4,9	
<i>Afrique</i>				
République Centra- fricaine				
(Bangui) . . . . .	Le kg : 25 FCFA	Le kg : 40 FCFA	50	80
(Intérieur) . . . . .		Le kg : 40 FCFA		80
République Mal- gache (Tanararive)	Le kg : 20 FCFA			40
République du Niger (Niamey) . . . . .	Les 10 kg : 180 FCFA	Le kg : FCFA	36	40
République du Tchad (Fort-Lamy) . . . . .		de 0 à 500 kg : 13 FCFA de 500 à 750 kg : 12 FCFA de 750 à 1 000 kg : 11 FCFA au-dessus de 1 000 kg : 10 FCFA		20
Haute-Volta (Ouaga- dougou) . . . . .	La barre de 25 kg : 120 FCFA			
Gabon (Libreville et Port-Gentil) . . . . .	Le kg : 4 FCFA	Le kg : 6 FCFA	8 (pêcherie)	12
<i>Divers pays</i>				
Argentine (Buenos Aires) . . . . .	Barre de 25 kg : 16 pesos	Barre de 25 kg : 25 à 30 pesos	3,7 (usine)	5,8 (domicile)
Haïti (Port-au- Prince) . . . . .	Les 100 livres (45 kg) : 0,80 dol- lars E.-U.	1 cent la livre	8,8	11
Thaïlande . . . . .	19 ticaux = 300 Pbs 1 Pb = 453 gr	9 ticaux = 100 Pbs	3,3	4,7

**Tableau 2. Prix de la glace en France**  
(En nouveaux francs par 100 kg, juillet-août 1960)

	Quai usine			Livres	
	Gros	Demi-gros	Gros plus de 20 T par an	Pains entiers	Fractions de pains
Lille . . . . .		6	6	8,4	9,6
Strasbourg . . . . .	3,9	4,8		6,8	8
Nancy . . . . .	4,4	4,8		7,6	8,4 à 11,2
Paris . . . . .	4,25		5,6 à 6,5	8,5 à 9	8,8 à 14
Nantes . . . . .	4,6	5,8 à 6,4	5,8	7,2	8 à 10,4
Dijon . . . . .	4	4,62		7,37	7,5 à 9
Lyon . . . . .	4,4	5,25	5,25	6,5 à 8	9 à 10,5
Clermont-Ferrand . . . . .	4,62			8	8,8 à 10,4
Bordeaux . . . . .	6,2	6,8		7,6	7,6
Bayonne . . . . .	5,5	6,5	6	9	10
Toulouse . . . . .	4,4	6,8	6,6	7,6	8,8
Carcassonne . . . . .	5,6	6,4		7	8,8
Perpignan . . . . .	5	6,5	6,25	6,5 à 8	9
Béziers . . . . .	4,8	5,2 à 6	6,2	8,4	8,8
Sète . . . . .	4,8	5,2 à 6	6,4	8,8	9,6
Marseille . . . . .	4,9	6	5	8	8,8 à 10
Avignon . . . . .	4 à 4,5	5		7	8
Toulon . . . . .	4,87	5,75	6	6,9	9,37
Nice . . . . .		7,2 à 8	6,4 à 7,2	8	10,4

unité, mais il est à remarquer que, pour servir un groupe d'unités ou de grosses unités, un seul homme suffit.

A titre de comparaison et pour montrer que ce genre d'appareil n'est pas très loin d'être rentable

et le deviendrait probablement avec quelques améliorations, nous donnons ici le prix de la glace (gros et détail) qui semble être pratiqué dans quelques régions du monde (tableau 1) et dans diverses villes de France (tableau 2).

### Références

1. Baum, V. A., *Revue Priroda* (La Nature), janvier 1954, pp. 45-53.
2. Baum, V. A., Communication au Congrès international sur l'énergie solaire, Phoenix (Arizona), novembre 1955.
3. Trombe, F., Brevet C.N.R.S. du 4 août 1955.  
Trombe, F. et Foëx, M., *C. R. Ac. Sci.*, 242, 1 000 (1956).
4. Trombe, F. et Foëx, M., Colloque International du C.N.R.S. sur les Utilisations de l'Énergie Solaire dans le domaine de la Recherche et de l'Industrie, Mont-Louis, 1958.

### Résumé

L'appareil décrit est du type à absorption à ammoniac, à caractère intermittent. Le jour, on procède à la distillation du gaz ammoniac en chauffant la solution aqueuse ammoniacale circulant dans des tuyauteries de fer chauffées par le rayonnement solaire rendu convergent par des miroirs cylindro-paraboliques en alliage aluminium-magnésium. La nuit, l'ammoniac liquide stocké sous pression est évaporé et réabsorbé par la solution

refroidie et qui présente alors une concentration minimum. Cet appareil présente une faible inertie, une petite partie seulement de la solution ammoniacale étant chauffée et les calories fournies, en dehors de celles qui sont nécessaires pour distiller le gaz ammoniac, étant récupérées dans un échangeur prévu à cet effet. Il fonctionne sans le secours d'aucune pompe, électrique ou autre, et comporte une réfrigération sans circulation ni renouvellement de

l'eau. Deux prototypes donnant respectivement 6 kg et 100 kg de glace par jour ont été réalisés. Des études sont poursuivies pour améliorer le prix de revient d'un appareil donnant 100 à 500 kg de glace par jour. En se basant sur le prix de revient des appareils actuellement construits, on calcul le prix du kg de glace en divisant la production annuelle de glace, en kg, par le dixième du prix de revient. On obtient un prix, au kg, de l'ordre

de 8 à 10 anciens francs (il n'est pas tenu compte de la main-d'œuvre, minime, qui est nécessaire pour le fonctionnement de l'appareil). Un bilan du prix de la glace (détail et gros) est donné pour la France, l'Europe et l'Afrique. Il apparaît que, dans certaines zones, en particulier africaines, les appareils décrits donneraient de la glace moins chère que celle qui est actuellement proposée.

# ECONOMIC BALANCE SHEET OF ICE MANUFACTURE WITH AN ABSORPTION MACHINE UTILIZING THE SUN AS THE HEAT SOURCE

(Translation of the foregoing paper)

F. Trombe and M. Foëx \*

The climate prevalent in most of the arid zones near the tropics is in general hot and dry, accompanied by insolation which is most often intense and regular. In these zones, still for the most part without developed sources of energy, refrigeration by the aid of solar radiation may be of altogether exceptional interest. Various research and development work has already been done along this line; in particular, V. A. Baum, at Tashkent (Uzbek S.S.R.) has designed and built a set of solar refrigerators with a daily ice production of 250 kg (1, 2). The steam required for operation of the refrigerator itself is generated by a boiler placed at the focus of a large parabolic mirror constantly oriented towards the sun.

At the Montlouis Solar Energy Laboratory we proposed to develop a refrigerator operating on an intermittent ammonia cycle, with the ammonia solution directly heated in the zone of concentrated solar radiation. Such a cycle is well adapted to the use of such radiation. The ammonia solution is heated during insolation, yielding ammonia gas under pressure, which is then liquefied. The cold (due to the distillation and redissolving of the ammonia gas) is generated after sunset and during the night.

## Description of the apparatus (3, 4)

The apparatus, entirely of welded steel, comprises the following parts (figure 1) :

(a) A reserve tank A, completely filled with ammonia solution. This tank must remain cold. During the various phases of operation, its upper part contains solutions richer in ammonia than the solution in its lower part. This superposition may be stable, since the weak solutions are denser than the richer ones.

(b) A heat exchanger B, consisting of concentric pipes.

(c) A heating tube C, on which the solar energy is concentrated by a cylindro-parabolic mirror made of aluminium-magnesium alloy (3 per cent of magnesium), brightened by means of anodic oxidation and

termed Brillalumag. The focal length of the mirror is 25 cm, and its aperture is about 4. It is rotatable about its optical axis, which occupies an East-West position, by means of circular metal supports, so as to obtain the inclination most favourable to a good concentration of energy on the tube. A single daily adjustment is sufficient, close to an equinox, while 5 to 6 adjustments a day are required at solstice time.

(d) A boiler D, containing enough liquid to permit the distillation of the quantity of ammonia gas that can be produced in a single day.

(e) A condenser E, cooled by a non-replenishable water reserve F, placed in a tank protected against all action of the solar radiation by means of a suitable coating. This coating must also permit the cooling of the water at night.

(f) A liquid ammonia reservoir H, surmounted by the coil G and communicating with another coil I

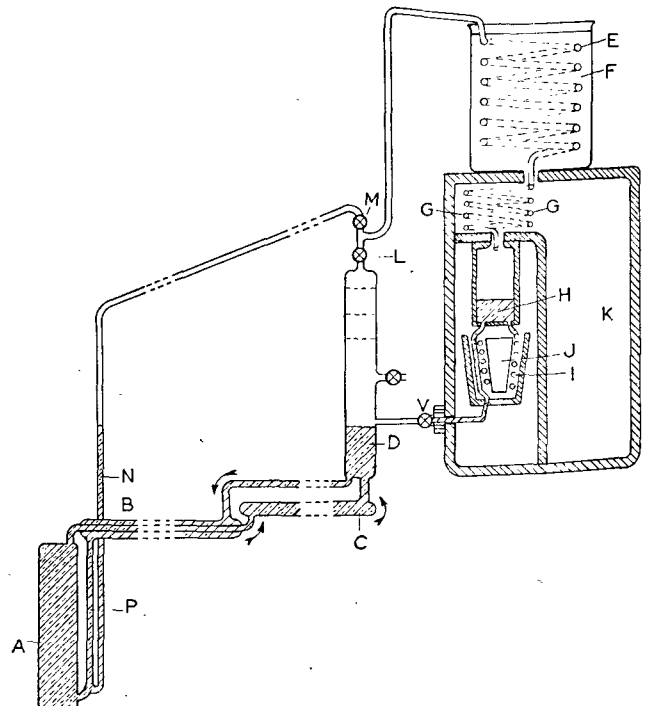


Figure 1

\* Laboratoire de l'énergie solaire du Centre national de la recherche scientifique, Mont-Louis, Pyrénées-Orientales, France.



Table 1. Ice prices in various countries

	Wholesale (at plant)	Retail	Price in new francs	
			Wholesale (100 kg)	Retail (100 kg)
<i>Europe</i>				
Belgium . . . . .	25 kg cake : 15 Belgian francs	25 kg cake : 24 Belgian francs		5.9 (plant) 9.4 (home)
Denmark . . . . .	80 Danish kröne per metric ton (discounts on these prices for large annual consumption)	104 Danish kröne per metric ton	5.6 (plant)	7.3 (home)
	<i>Metric tons</i>	<i>Danish kröne</i>		
	5 . . . . .	0.75		
	25 . . . . .	1.00		
	50 . . . . .	1.25		
	100 . . . . .	1.50		
	150 . . . . .	2.00		
	200 . . . . .	2.50		
Great Britain . . . . .	£4 per ton	£4/10 per ton	£0/6/2	
Greece (Saloniki) . . . . .	25 kg cake : 3.80 drachmas (untaxed)	25 kg cake : 6.10 drachmas	2.9	4.03
	25 kg cake : 4.40 drachmas (taxed)			
Hungary . . . . .	Per 100 kg :	Per 100 kg :		
Budapest . . . . .	14.50 forints	16 forints		
Province . . . . .	16 forints			
Italy . . . . .	Per 100 kg : lire 440	Per 100 kg : lire 680	3.4	5.3
Netherlands . . . . .	25 kg cake : florins 0.56 Per metric ton : florins 20 (fish) 25 kg cake : florins 0.60 to 0.80 (cif for chemical industries)	25 kg cake : florins 1.10	2.9 to 3.9	5.9
Yugoslavia . . . . .	Per metric ton : 4 000 dinars	Per metric ton : 6 300 dinars	3.0 to 4.9	
<i>Africa</i>				
Central African Re- public (Bangui) . . . . .	Per kg : 25 FCFA	Per kg : 40 FCFA	50	80
(Interior) . . . . .		Per kg : 40 FCFA		80
Malagasy Republic (Tananarive) . . . . .	Per kg : 20 FCFA			40
Niger (Niamey) . . . . .	Per 10 kg : 180 FCFA	Per kg : FCFA	36	40
Chad (Fort Lamy) . . . . .		From 0 to 500 kg : 13 FCFA From 500 to 750 kg : 12 FCFA From 750 to 1 000 kg : 11 FCFA Over 1 000 kg : 10 FCFA		20
Upper Volta (Ouga- dougou) . . . . .	25 kg cake : 120 FCFA			
Gabon Libreville and Port Gentil . . . . .	Per kg : 4 FCFA	Per kg : 6 FCFA	8 (fisheries)	12
<i>Various countries</i>				
Argentina (Buenos Aires) . . . . .	25 kg cake : 16 pesos		3.7 (plant)	5.8
Haiti (Port-au- Prince) . . . . .	100 pounds (45 kg) : US\$0.80	1 cent per pound	8.8	11
Thailand . . . . .	19 ticals = 300 pbs 1 pb = 453 grammes	9 ticals = 100 pbs	3.3	4.7

**Table 2. Price of ice in France**  
Price in new francs per 100 kg, July-August 1960

France	At plant dock			Delivered	
	Wholesale	Semi-wholesale	Wholesale, over 20 metric tons annually	Whole cakes	Part of cake
Lille . . . . .		6	6	8.4	9.6
Strasbourg . . . . .	3.9	4.8		6.8	8
Nancy . . . . .	4.4	4.8		7.6	8.4 to 11.2
Paris . . . . .	4.25		5.6 to 6.5	8.5 to 9	8.8 to 14
Nantes . . . . .	4.6	5.8 to 6.4	5.8	7.2	8 to 10.4
Dijon . . . . .	4	4.62		7.37	7.5 to 9
Lyon . . . . .	4.4	5.25	5.25	6.5 to 8	9 to 10.5
Clermont-Ferrand . . . . .	4.62			8	8.8 to 10.4
Bordeaux . . . . .	6.2	6.8		7.6	7.6
Bayonne . . . . .	5.5	6.5	6	9	10
Toulouse . . . . .	4.4	6.8	6.6	7.6	8.8
Carcassonne . . . . .	5.6	6.4		7	8.8
Perpignan . . . . .	5	6.5	6.25	6.5 to 8	9
Béziers . . . . .	4.8	5.2 to 6	6.2	8.4	8.8
Sète . . . . .	4.8	5.2 to 6	6.4	8.8	9.6
Marseille . . . . .	4.9	6	5	8	8.8 to 10
Avignon . . . . .	4 to 4.5	5		7	8
Toulon . . . . .	4.87	5.75	6	6.9	9.37
Nice . . . . .		7.2 to 8	6.4 to 7.2	8	10.4

surrounding the ice freezer J; the entire assembly is contained in the cold chamber K.

(g) The cocks or valves L and M permitting the distillation of the ammonia during the day and its reabsorption during the night in the ammonia solution that has become weak during the day.

(h) A cock V for purging the liquid residues from the evaporator I at the end of the refrigerating period.

During heating, the cock L is open and the cock M closed. The circulation of the ammonia solution is maintained by the liberation of bubbles of ammonia gas at the level of the tube C, and as far as the boiler D. The weak hot solution coming from D exchanges its heat with the cold liquid, aspirated to the upper part of the reservoir, and then rejoins the bottom of the same reservoir. The ammonia gas liberated passes into the condenser, where it is liquefied and returned to the reservoir H and the coil I through the coil G.

To produce cold after the solar heating is stopped or ceases, the cock M is opened and the cock L is closed. The ammonia gas is aspirated through the pipes N and O as a result of the cooling of the boiler D. The liquid-gas mixture in the pipe O ensures the general circulation of the ammoniacal solutions in the sense indicated by the arrows. This accelerates cooling of the boiler, and the pressure falls, leading to distillation of ammonia gas. This distillation takes place at first in the assembly: coil I, reservoir H — but since H is insulated, its temperature falls, and the consumption of cold then takes place only at the level of the coil I. The rate of distillation depends, on the one hand, on the rate of cooling of the ammonia solutions, and, on the other hand, on the heat flow to the coil I.

The advantages of the above apparatus are as follows:

(a) A low inertia. Except for the short initial period required for heating the heating tube, and the ammonia solution contained therein, practically no energy is consumed other than that required to distil the ammonia gas, the heat supplied in excess of these requirements being largely recovered in the heat exchanger.

(b) The refrigeration efficiency varies little from the beginning of absorption to the end, the gas liberated always encountering the weakest solutions.

(c) There is only a slight difference between the absorption and distillation temperatures. This result is obtained owing to the good absorption conditions and the presence of a cold reserve of optional size.

(d) The total absence of pumps for circulating the ammonia solution, or for any other purpose. The apparatus operates exclusively by solar energy, without any other energy input, in particular, without using electricity.

## Results

The tests were made on an apparatus with 1.5 m<sup>2</sup> of solar collecting surface, and a different apparatus with 0.18 m<sup>2</sup>. The daily output of ice was 6 and 95 kg, with the actual duration of ammonia gas distillation ranging from 4 1/2 h to 5 h, without counting the preheating period, which was about 1 1/2 h. The energetic efficiency, which was better for the 18 m<sup>2</sup> apparatus than for that of 1.5 m<sup>2</sup>,

seems to be amenable to still further substantial improvement.

### Improvements envisaged

The research is at present being prosecuted along various lines:

- (a) Reducing the cost of the reflecting surfaces.
- (b) Comparison of installations with East-West parabolic mirror and installations with mirror rotating about the celestial axis.
- (c) Comparison of installations with cylindro-parabolic mirrors and those with paraboloidal mirrors used in conjunction with orienting devices.
- (d) Reducing the weight of the ammonia circuit.
- (e) Efficiency study for various source and sink temperatures during daytime distillation (production of liquid  $\text{NH}_3$ ).
- (f) Study of efficiency at varying temperature of nocturnal distillation (ice production or space cooling without ice production).
- (g) Study of more powerful prototypes giving 100 to 500 kg of ice per day.

### Study of the cost of ice produced with the 18 m<sup>2</sup> apparatus

The cost of the present model (18 m<sup>2</sup>) is about 2 million old francs (or about 20,000 NF). Although this cost could be appreciably reduced, we shall nevertheless adopt it as the base. The annual depreciation of the apparatus (10 per cent) is thus of the order of 200 000 old francs. The annual ice output is :

- 28 500 kg for 300 days of sunshine;
- 23 500 kg for 250 days;
- 19 000 kg for 200 days.

The cost of ice per kg will be respectively, in old francs, 7, 8.50 and 10.50. This does not include the cost of labour necessary to maintain the refrigerator. It would be proportionally a very heavy burden for the operation of a single unit, but it should be noted that a single man will do to service a group of units, or large units.

For comparative purposes, and to show that apparatus of this kind is not very far today from being economic, we append the prices of ice (wholesale and retail) that appear to be current in several regions of the world.

### References

1. Baum, V. A., *Priroda*, pp. 45-53, January, 1954.
2. Baum, V. A., Paper presented to International Congress on Solar Energy, Phoenix, Arizona, November, 1955.
3. Trombe, F., Patent, assigned to National Scientific Research Centre, issued 4 August, 1955; Trombe, F. and Foëx, M., *C.R. Ac. Sci.*, 242, 1 000, 1956.
4. Trombe, F. and Foëx, M., International Colloquium of National Scientific Research Centre on the Utilization of Solar Energy in Research and Industry. Mont-Louis, 1958.

### Summary

The machine described is of the ammonia absorption type and operates intermittently. During the day, ammonia gas is distilled by heating the aqueous ammonia solution circulating in iron piping heated by solar radiation focused by cylindro-parabolic mirrors of aluminium-magnesium alloy. At night, the liquid ammonia accumulated under pressure is evaporated and reabsorbed by the cooled solution, which then has a minimum ammonia concentration. This machine has only a low inertia, since only a small part of the ammonia solution is heated, and the heat supplied in excess of that required to distill the ammonia gas is recovered in a heat exchanger provided for that purpose. It requires no pump, electric or non-electric, for operation, and provides refrigeration without circulation or replenishment

of water. Two prototypes producing 6 and 100 kg of ice per day have been developed. Studies are in progress to reduce the cost of a machine with a daily production of 100 to 500 kg of ice. Based on the cost of the machines that have been built, the cost of ice per kg is calculated by dividing the annual ice output, in kg, by 1/10 of the machine cost. The cost per kg so found is about 8 to 10 old francs (without taking account of the very low labour cost required to keep the machine in operating condition). The authors present a statement of the retail and wholesale prices of ice in France, Europe and Africa. It appears that in certain areas, especially in Africa, these machines would produce cheaper ice than that now on the market.

## THE ALTENKIRCH SOLAR-COOLED HOUSE

S. Adler, G. Levite and H. Tabor \*

The work reported here shows negative results. It is, however, presented because of the general interest in the subject-matter and in the hope that it might stimulate new ideas.

### Basic concepts

The idea of a house cooled by solar energy, built in the form of an open cycle absorption machine using water as the "refrigerant", was first proposed by the late Prof. Altenkirch (1). It was mentioned briefly in Dr. Dannies' book "Absorbtiionskaeltemaschinen" (2) and was recently described in "Solar Energy" (3).

It appears that two houses built on these ideas were constructed in Europe in the 1930s, but there are no published results and the houses were destroyed in the Second World War.

The idea is ingenious and attractive in its apparent simplicity. Its execution in practice turns out to be extremely difficult.

The idealised operation of the house is best explained by reference to figure 1 which shows a schematic vertical cross section of the house (or of one storey) which in plan is rectangular with the long sides facing east and west. The east-facing and west-facing walls, or parts of them, are made hollow and called "panels", the outer face of the panel being very thin, the inner face being well insulated thermally and the space between the faces containing an absorbent material such as cellulose or silica gel. Openings are provided in the panels as shown in figure 1. All windows are kept shut.

In operation, sunshine falling on the east wall in the forenoon heats the panels — which act as solar collectors — and causes a chimney effect pulling fresh air into the house through the cool west wall panels. This air is dehumidified while passing over the absorbent in the west wall, rejecting the heat of absorption through the thin face to the environment. Ideally, the dehumidification is isothermal.

The air then passes through a specially constructed evaporator and is adiabatically cooled. This is the end-purpose of the construction. After passing through the house, the air passes through the east wall out to the outside atmosphere. The solar

heating of the east-wall regenerates (i.e., dries) the absorbent material therein.

At noon, the western wall panels are saturated vis-à-vis the incoming air whilst the eastern are in a regenerated condition. When the sun passes to the west, it regenerates the western panels whilst the eastern panels act as absorbers. The cycle proceeds as before except that the air flow is reversed.

For humid climates, the evaporators are omitted, the householder being content with a reduction of humidity, but without reduction of dry bulb temperature. Indeed, under the best conditions, there will always be a slight rise in temperature in the drying process.

It is observed that no power supply is required and there are no mechanical parts. The system is thus particularly attractive for construction in hot under-developed areas.

For these reasons it was decided to put up an experimental house in the Negev Institute for Arid Zone Research in Beersheba to test out the idea. Dr. Ing. J. H. Dannies, a former collaborator of Prof. Altenkirch, was invited to act as consultant and he supervised the design and execution of the experimental house and the first tests.

### Description of the experimental house

The experimental house had a floor area of 5 × 12 metres, i.e., 60 sq m and a room height of 2.5 m. The east and west walls each contained 11 panels 1.1 metres wide and 2.2 m high. Each panel was, for construction purposes, divided vertically into two half panels 0.53 m wide. In effect the whole of the east and west facing walls were in the

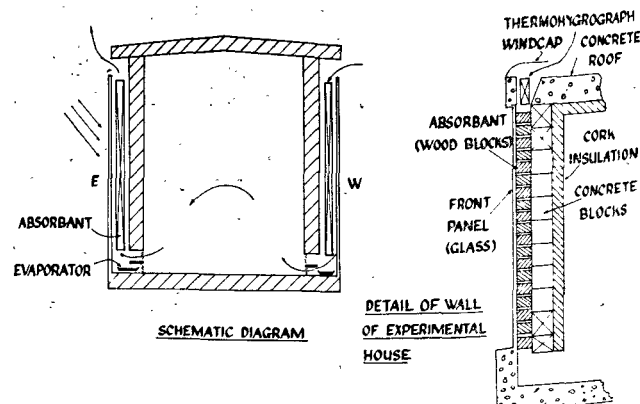


Figure 1

\* Negev Institute for Arid Zone Research, National Physical Laboratory of Israel, Jerusalem.

form of collector panels. Whilst window areas were put in the building, they were filled in for the experimental period (to be knocked out later). The entrance to the house was from the south end where a refrigerator type door and an air lock were incorporated to reduce the disturbance caused by entering and leaving the building. The interior was divided temporarily into three sections by insulated partition walls so that up to three experiments could be conducted simultaneously, if necessary, for comparison purposes. At Dr. Dannies' suggestion, the entire wall, ceiling and floor area was lined with 10 cm of cork board to provide thermal insulation thereby permitting better control of the thermal conditions in the structure.

As originally designed, the panels had black metal outer faces. This yielded a poor solar collector and several of the panels were subsequently converted to have glass on the outer face, the absorbent being blackened to absorb solar energy. It may readily be shown that, as a rejector of heat, a glass faced panel is almost equivalent to a metal faced panel, for the thermal resistance is mainly in the air films, whilst, as a solar collector, the glass faced panel is superior as the heat is generated *inside* the panel.

The absorbent used was wood cut in slices  $120 \times 60 \times 12$  mm and mounted in racks with 12 mm spaces between adjacent slices. Wood was selected because it was considered to be relatively cheap and readily available, and because an enthalpy diagram was available in Altenkirch's "Absorbtions-kaeltemaschinen" (4).

Facilities were provided for the insertion of recording thermohygrographs at the top and bottom of selected panels.

The house was completed in June 1960. The first results showed very small temperature rise in the panels and the chimney effect was almost unmeasurable. This was with the metal faced panels. A slight improvement was registered when glass faced panels were introduced but it was clear that the house would have negligible cooling effect. For this reason the evaporators were not introduced into the house at this stage, and it was decided to make a more thorough study of the theory of the house and of the collector panels.

## Basic theory

### THE COLLECTOR PANELS

When used as a solar collector, the panel must lose the minimum amount of heat to the environment. When used as an absorber, it must reject heat freely to the environment. This contradiction in function is one of the weak points of the whole concept and, as will be shown in a later section, renders the house unworkable until some new ideas are forthcoming. Appendix I shows that whilst a metal faced and glass faced panel have almost the same performance for heat rejection, the glass faced

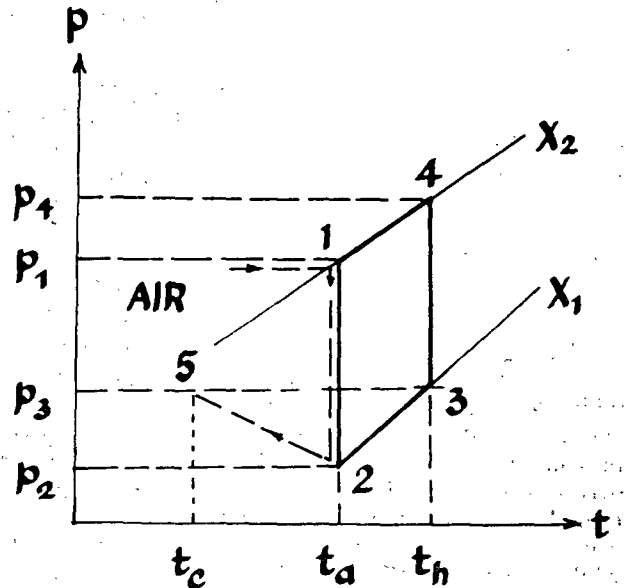


Figure 2

panel is far superior as a solar collector and only this form can be considered further.

Calculations showed that peak air temperature rises (for zero air flow) of the order of  $70^{\circ}\text{C}$  should be obtained with the glass faced panels, but in fact the temperature rises recorded were only about half this. It was subsequently proved that this was due to the high heat capacity of the concrete walls of the panel and the very short insolation period (3-4 hours). This means that the cork insulation placed inside the walls of the house should be on the *outside* of the walls (i.e., inside the panels) so that the sunshine does not have to heat up the concrete. When 2" of celotex was put inside the panel to insulate the concrete wall from the airstream, air temperature rises approaching the computed value were obtained.

### THE ABSORPTION CYCLE

This is best described with reference to figure 2, which shows constant water content curves (of the absorbent)  $X_1$ ,  $X_2$  against water vapour pressure and temperature, for an absorbent such as wood or silica gel. If the pressure ordinate is logarithmic and the temperature abscissa reciprocal absolute temperature, the constant water content lines are practically straight.

After the absorbent has been dried to the low water content  $X_1$  at the regeneration temperature  $t_h$  (point 3) it is allowed to cool down to ambient temperature  $t_a$  (point 2). The air to be conditioned, with the initial vapour pressure  $p_1$  and temperature  $t_a$  (point 1) is passed over the absorbent and dried to the low vapour pressure  $p_2$  (point 2). Heat of absorption is assumed to be removed constantly so that the process is isothermal. This is continued until the absorbent is saturated (in respect to the incoming air) at the high water content of  $X_2$  that corresponds

to the water vapour pressure in the incoming air (point 1).<sup>1</sup>

The absorbent (at point 1) is then heated to  $t_h$ , point 4, and regenerated isothermally, through a continuous supply of heat, down to a water content of  $X_1$ , and water vapour pressure  $p_3$  (point 3). (After cooling from point 3 to point 2 at constant water content  $X_1$  the absorbent is back at the starting point of its cycle.)

The air that has been dried isothermally, i.e.,  $t_a$ , vapour pressure  $p^2$  (point 2) can be humidified adiabatically to reduce its temperature until it reaches a temperature  $t_c$  and a vapour pressure  $p_3$  (point 5). The air, after passing through the house and regenerating the panel, leaves with a vapour pressure  $p_4$ , after carrying with it the water vapour driven out of the absorbent by the heat of regeneration. It is this vapour pressure that exists at the leaving end of the regeneration panel (point 4) whilst the rest of the panel has reached point 3.

By studying the enthalpy diagram for the absorbent, the quantities of heat required for the heating process and the rejection process can be determined.

It will now be shown that, under ideal conditions, the coefficient of performance COP, expressed as total cooling effect in kcal per kcal of heat supplied, is inevitably low. This is predominantly the result of the open cycle, i.e., the air introduced for conditioning the house leaves during the regeneration process thereby carrying away an unnecessary amount of sensible heat. If an absorbent could be found that had a large difference of water content (at the same vapour pressure) for two temperatures not far apart, the performance would be much better, but even the best absorbents appear to be remote from what is required here.

We first consider a purely hypothetical absorbent that can be regenerated, i.e., dried out, with negligible rise in temperature.

Thus, to expel 1 kg of water would, ideally, require simply the latent heat of vaporation  $L$  kcals of heat, there being no heating up of wood or air. ( $L = 540$  kcals if there is no heat of wetting.)

The quantity of air  $w$  that passes through the absorber to give up 1 kg of water is given by :

$$w = \frac{1}{\Delta X_a}$$

where  $\Delta X_a$  is the change of water content of air in kg/kg between the outside condition and the condition after drying.

This air is subsequently humidified adiabatically and thereby cooled to a temperature  $t_c$  after which it warms up, by absorbing heat from the room, to  $t_r$ .

The cooling effect  $R$  is, therefore,

$$R = w C_a (t_r - t_c)$$

where  $C_a =$  specific heat of air  $= 0.24$ .

The COP of this idealised system is

$$\begin{aligned} \text{COP} &= \frac{\text{cooling effect}}{\text{regenerator heat}} = \frac{(t_r - t_c) w C_a}{L} \\ &= \frac{(t_r - t_c)}{\Delta X_a \cdot \frac{C_a}{C_a}} = \frac{(t_r - t_c)}{2250 \Delta X_a} \end{aligned}$$

taking  $L = 540$  and  $C_a = 0.24$ .

In no practical case will the numerator exceed  $10^\circ\text{C}$ —it will often be considerably less.  $\Delta X_a$  depends upon the initial air condition. For example, for air at  $35^\circ\text{C}$  and 45 per cent RH, dried down to 10 per cent RH  $\Delta X_a = 0.012$ ;  $t_c$ , after adiabatic humidification will be  $16\text{--}17^\circ\text{C}$ : assume  $t_r = 26\text{--}27^\circ\text{C}$  and we obtain:

$$\text{COP} = 0.37$$

Now because any real absorbent requires a considerable temperature swing to change its water content by a reasonable amount, it may readily be shown that, under ideal conditions, i.e., perfect heat transfer and mass transfer, the COP is given by:

$$\text{COP} = \frac{t_r - t_c}{\frac{\Delta X_a}{\Delta X_b} \cdot \frac{C_a}{C_b} (t_h - t_a) + (t_h - t_r) + \Delta X_a \frac{L'}{C_a}}$$

where  $t_h =$  regeneration temperature

$t_a =$  outdoor temperature

$\Delta X_b =$  change of water content of absorbent kg/kg between the moist and regenerated conditions

$C_b =$  specific heat of absorbent

$L' =$  latent heat of vaporisation of water plus heat of wetting.

We note that the denominator now contains two additional terms: the first is due to the sensible heat supplied to the absorber, the second is due to the sensible heat supplied to the air during regeneration.

We consider the likely values of the quantities appearing in the equation:  $t_c$  and  $t_r$  have been discussed and  $t_r - t_c$  can hardly exceed  $10^\circ\text{C}$  and will often be far less.

$\Delta X_a$  will always be less than  $X_a$ , the moisture content of the outdoor air, since it cannot be dried down to zero moisture. In the example given  $\Delta X_a = 0.012$ . (For small values of  $\Delta X_a$ , i.e., very low outdoor humidity, the COP is improved but a point is reached where the Altenkirch drying is unnecessary; the evaporative cooler alone suffices.)  $\Delta X_b$  depends upon the absorbent used and will in practice always be several times  $\Delta X_a$ . Indeed it should be large, for the ratio of weight  $q_b$  of absorbent required to

<sup>1</sup> The drying of the air and the gradual humidification of the absorbent is a counterflow exchange process. It can be considered complete when all the absorbent, except for the last portion of the air-flow outlet, is saturated but the last portion is still dry. Thus the air emerges dry.

weight  $q_a$  of air handled per cycle is, for ideal moisture exchange,

$$\frac{q_b}{q_a} = \frac{\Delta X_a}{\Delta X_b} = N$$

and we have to keep the quantity of absorbent low for economic reasons.<sup>2</sup> The ratio  $N$  in two practical cases was 1/3 for wood and 1/11.2 for silica gel.

$C_b$  is approx. 0.5 for wood, or  $\frac{C_a}{C_b} \sim 2$ . This then yields a value for the COP of the order :

$$\begin{aligned} \text{COP} &\sim \frac{10}{2(t_h - t_a)N + (t_h - t_r) + 2500 \Delta X_a} \\ &\sim \frac{1}{0.2(t_h - t_a) + 0.1(t_h - t_r) + 3.0} \end{aligned}$$

taking  $\Delta X_a = 0.012$  and  $L' \sim 600$ . A regeneration temperature of at least 60°C is required for practical absorbents, so taking  $t_h = 60$ ,  $t_a = 35$ ,  $t_r = 27$ , we obtain

$$\text{COP} \sim \frac{1}{7.6} \text{ for } N = 1/3$$

or 
$$\sim \frac{1}{6.7} \text{ for } N = 1/11$$

These coefficients are based on completely idealised conditions of temperature and vapour pressure equilibria in the panels. When the calculations are repeated, making reasonable assumptions concerning temperature differences, and using enthalpy diagrams for such materials as wood and silica gel, the COPs come out somewhat lower.

The following table gives the results as obtained from the enthalpy diagrams for wood and silica gel.

Table 1

Examples of three cases. Initial air condition 34°C and 45 per cent RH. Final room temperature 25°C; regeneration temperature 60°C. Regeneration energy supply 300 kcal/per sq m of panel per hour for three hours.

Case 1. Wood as absorbent. Assumed to be 40°C during absorption process. Air assumed to emerge at 37°C.

Case 2. As Case 1, but using silica gel.

Case 3. As Case 1, but "idealised", i.e., allowing no temperature difference, i.e., wood and air 34°C in absorber.

Tabulation of results

	Case 1	Case 2	Case 3
COP . . . . .	0.10	0.123	0.15
Panel area per ton of cooling <sup>a</sup> m <sup>2</sup> . . . . .	101	81	68
Weight of absorbent required per ton of cooling, kg . . .	1 475	400	704
Heat rejected during drying, kcal/m <sup>2</sup> , hour . . . . .	164	132	186

<sup>a</sup> Ton of cooling means 3 000 kcals per hour, for three hours in present example, i.e., the areas shown give 9 000 kcals of cooling in a cycle. For twice the area of panels, i.e., using both east and west walls, six hours of cooling are obtained per day.

It is these rather low COPs that make the Altenkirch house difficult to execute. In the first place the area of collector must be very large. Secondly the amount of heat to be rejected during absorption is large and the air dehumidification process consequently is far from isothermal.

Energy availability

In the previous section we assumed a regeneration heat of 900 kcals/m<sup>2</sup> per cycle. This was based upon an assumption of 33 per cent efficiency of collection for the collectors, which being vertical will have a lower efficiency than the same collectors when tilted because of large incidence angles and lower peak intensity.

For local conditions (latitude 32°) the solar insolation on an east or west vertical wall, for clear days, is approx.:

May 2 720; June 2 780; July 2 870; August 2 800  
September 2 380; mean 2 710 kcals/per m<sup>2</sup>

To the extent that the collector might be more efficient than the 33 per cent assumed, the area of collector panels required would be correspondingly reduced.

Conclusions and recommendations

It is seen that, with the type of absorbents considered (wood or silica gel), the area of collector panel required to produce the equivalent of one ton of cooling for six hours, i.e., 18 000 kcals of cooling, will be of the order of 150-200 sq metres, half on each side of the building, and a method must be found for removing the absorption heat from the panels. The "chimney effect" on a 2 m high wall appears to be inadequate, so either a fan must be used or much taller panels employed. Better absorption materials requiring lower regeneration temperatures might improve the COP thereby reducing the size of the panels and a further improvement would result from a better collector efficiency. But low regeneration temperatures mean, generally, that more absorbent is needed and there may be insufficient space in the panels to hold it.

Whilst no attempt has been made to determine the cost of the panels and absorbent for the present system, it is clear that such large areas are out of the question. For this reason work on the experimental house has been suspended until new ideas on raising the efficiency are forthcoming.

Can anything be done to improve the situation? Dr. Dannies, in a private communication, has suggested that the sensible heat requirements in the regeneration process are less than those postulated here and similarly the problem of heat rejection in the absorption process is not as serious as it seems. The reason given is that in both processes there is a moving zone of wetness or dryness in the panel as the air moves along so that the processes are analogous to a counterflow heat exchanger. Analytical studies to date suggest that this argument is not valid or if so, then only to a very minor degree.

<sup>2</sup> Or because of space limitations in the panel.

The daily sunshine falling on a unit area of a tilted collector facing south (in the northern hemisphere) will be almost three times that falling on an east or west facing vertical collector. The *mean* intensity during the day will also be considerably greater, leading to a higher collector efficiency. This means that a "roof" collector will give 3-4 times as much energy as a "wall" collector of the same area. This suggests that an absorption cycle — even of the open cycle type — would have a better chance of success if based on roof collectors than wall collectors. Of course some mechanism for cycling would be necessary.

The Altenkirch "house" may be more successful as a drying chamber, i.e., used without evaporators, than as a cooling chamber, and Dr. Dannies has reported on such use for the drying of timber. In the first place the absorption process need not be isothermal. In the second, the air passing through the chamber to the regenerator is not moistened to the same degree as with the evaporative cooler, so the regenerator can dry to a lower water content. It would be interesting to make an economic analysis of such an application.

## Appendix I

### COMPARISON OF BLACK METAL PANELS AND GLASS-FACED PANELS

#### Case 1. Metal faced panel

The efficiency  $E$  of a panel face in transferring absorbed solar energy into the airspace within the panel is readily shown to be:

$$E = \alpha \left[ \frac{k(1 - \Delta T_i / \Delta T_o)}{1 - k(1 - \Delta T_i / \Delta T_o)} \right]$$

Temporise inside panel for peak solar incidence : °C		10	15	20	25	30	35
(a)	E % : Metal panel . . . . .	17.2	12.8	7.4	—	—	—
	Glass panel . . . . .	61	54	48	41	35	28
(b)	E % : Metal panel . . . . .	33	29	26	22	18	14
	Glass panel . . . . .	64	59	54	48	43	38

(a) is for 16 kph wind : (b) is for zero wind.

The calculations assume the same mean temperature over the whole length of the panel. In practice the panel is hotter at the top. Values are for peak solar incidence, taken as 600 kcal/hr, m<sup>2</sup>, °C. For lower values, the temperature rises are proportionately less.

When the panels are used for heat rejection, the resistance  $R$  to heat flow outwards is

$$R = \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_i} + r_f$$

where  $r_f$  is the thermal resistance of the panel face. This term is very small compared with the other two terms and there is very little difference between the metal faced and glass faced panels.

As a collector of heat, the glass faced panel is far superior to the metal faced panel. As rejectors of heat the performance is about the same in both cases.

where  $\alpha$  = absorption coefficient of black panel face taken as 0.9 in the present calculations.

$$k = \frac{h_i}{h_o} = \frac{\text{heat transfer coeff. from panel face inwards}}{\text{heat transfer coeff. from panel face outwards}}$$

$$\Delta T_i = T_i - T_a = \text{temp. rise inside panel above ambient}$$

$$\Delta T_o = T_p - T_a = \text{temp. rise of panel face above ambient } T_a$$

As  $h_o$  is the outside coefficient, dependent on the wind, and  $h_i$  is a free convection coefficient inside the panel,  $h_i < h_o$ , i.e.,  $k < 1$ . A value of  $h_i = 8.25$  kcal/hr, m<sup>2</sup>, °C (1.5 btu/hr, ft<sup>2</sup>, °F) is assumed. This is probably the highest value likely to occur unless forced convection is employed. The value for  $h_o$  is taken as 19.4 kcal/hr, m<sup>2</sup>, °C (4 btu/hr, ft<sup>2</sup>, °F) for a wind of 16 kph (10 mph) and as 10 kcal/hr, m<sup>2</sup>, °C for zero wind.

At zero collection efficiency, i.e.,  $\Delta T_i = \Delta T_o$ , i.e.  $T_i = T_p$  (and no air flow in the panel) the panel face temperature rise is

$$T_p - T_a = \frac{\alpha Q}{h_o} = T_i - T_a$$

where  $Q$  is the solar intensity. For an east or west facing wall the peak value of  $Q$  is taken as 600 kcal/hr, m<sup>2</sup>, °C.

#### Case 2.

If the panel is glass covered and the interior is blackened to absorb energy, the collection efficiency is

$$E = \alpha \beta - \frac{h_o}{Q} \frac{k}{(1+k)} \Delta T_i$$

where  $\beta$  = transmission through glass, taken as about 0.8 (due to large angles of incidence)

$\alpha$  = absorptivity inside panel taken as 0.925

The following table summarises the results:

## References

1. Altenkirch, E., Neue Thermodynamische Wege der Luftbehandlung, *Int. Symp. of Refrig.* 1936 *Int. Inst. Refrig.*, Paris, Vol 3, pp. 740-51.
2. Dannies, J. H., Absorbtiionskaeltemaschinen, *Brucke-Verlag Curt Schmiersow*, Hanover, 1951.
3. Dannies, J. H., Solar Air Conditioning and Solar Refrigeration, *Solar Energy*, Vol. III, No. 1, pp. 34-39, Jan. 1959.
4. Altenkirch, E., Absorbtiionskaeltemaschinen, *Ved. Verlag Technik Berlin*, 1954.



### Summary

Altenkirch suggested that a house could be constructed with the east and west-facing walls hollow and containing an absorbent such as wood or silica gel. In the forenoon the eastern wall acts as a solar collector, heats up and, by chimney effect, draws air into the house via the west wall which acts as an isothermal drying chamber. The dried air is then adiabatically cooled by contact with water in an evaporator. After passing through the house, this air passes through the east wall and out of the house, the east wall being regenerated (i.e., dried). In the afternoon the west wall is regenerated and the east wall acts as absorber, the air flow through the house being reversed. There are no mechanical parts and no electric power is required.

The theory of such a house is discussed in detail and it is shown that the open cycle results in low COP (coefficient of performance) of the order of 0.1, expressed as cooling effect per unit heat delivered

by the collectors. Furthermore the collector panels, facing east and west and being vertical, have a low energy yield. Using a regenerator temperature of 60°C, some 150-200 m<sup>2</sup> of collector panel is required for one ton of cooling for six hours and this is impractical. The drying process is far from isothermal because of the large heat of absorption to be dissipated. The chimney effect (on a 2 m high wall) was too small to be effective and a mechanical fan would appear to be essential.

Experiments on a 60 m<sup>2</sup> floor area house constructed on these principles have been suspended.

The COP and the collector efficiency could be improved if better absorbents were available requiring lower regeneration temperature. "Roof" collectors would give some four times more output than the "wall" collectors. The "house" may be more suitable as a drying chamber (i.e., without the evaporators) than as a cooling chamber.

## LA MAISON A REFROIDISSEMENT SOLAIRE D'ALTENKIRCH

### Résumé

Altenkirch a laissé entendre qu'il serait possible de construire une maison dont les murs orientés vers l'est et l'ouest seraient creux et contiendraient un absorbant tel que du bois ou du gel de silice. Pendant la matinée, le mur oriental jouerait donc le rôle de collecteur solaire, s'échaufferait et, par un effet du tirage, entraînerait de l'air dans la maison à travers le mur occidental, qui jouerait alors le rôle de chambre de séchage isothermique. L'air desséché est ensuite refroidi adiabatiquement par contact avec l'eau, dans un évaporateur. Après avoir traversé la maison, cet air passe par le mur oriental et sort de cette maison, ce mur oriental étant alors régénéré (c'est-à-dire séché). L'après-midi, c'est le mur occidental qui est régénéré et le mur oriental qui joue le rôle d'absorbeur, l'écoulement de l'air par la maison se faisant dans le sens inverse. Il n'y a pas de groupes mécaniques et on n'a besoin d'aucune énergie électrique.

Ce mémoire passe en revue dans le détail la théorie sur laquelle repose la réalisation d'une telle maison, ce qui révèle que le cycle ouvert donne un faible coefficient de rendement, de l'ordre de 0,1 p. 100 exprimé sous forme de l'effet de refroidissement

par unité de chaleur livrée par les collecteurs. Au surplus, les panneaux du collecteur, orientés vers l'est et l'ouest, étant verticaux, donnent peu d'énergie. En se servant d'une température de régénérateur de 60 °C, il faut entre 150 et 200 m<sup>2</sup> de panneaux de collecteur par tonne de refroidissement sur 6 heures, et ceci n'est pas pratique. Le processus de séchage est loin d'être isothermique, en raison de la grande chaleur d'absorption qui doit être dissipée. L'effet de cheminée, avec un mur de 2 m de haut, est trop faible pour être efficace, et un ventilateur mécanique semblerait être essentiel.

Les expériences commencées sur une maison ayant une surface de 60 m<sup>2</sup> construite d'après ces principes ont été suspendues. Les coefficients d'utilisation et de rendement du collecteur pourraient être améliorés si de meilleurs absorbants étaient disponibles, exigeant une température de régénération moindre. Les collecteurs installés sur le toit donneraient environ quatre fois plus de chaleur que les collecteurs montés sur les murs. La « maison » serait peut-être plus indiquée comme chambre de séchage, (c'est-à-dire sans évaporateur) que comme enceinte de refroidissement.

# ENGINEERING AND ECONOMIC STUDY OF THE USE OF SOLAR ENERGY ESPECIALLY FOR SPACE COOLING IN INDIA AND PAKISTAN<sup>1</sup>

N. G. Ashar\* and A. R. Reti\*\*

There is great interest in any device or process which can contribute to the economic industrial growth of under-developed nations such as India and Pakistan. Harnessing every available source of energy and providing comfortable working and living conditions would accelerate the pace of industrialization. In these countries solar energy has been used extensively for the production of common salt and for drying various fruit and food products. However, very few attempts have been made to use solar energy for power production, saline water conversion, or environmental control. This paper presents an engineering and economic study of a solar powered air-conditioning unit. A large body of experimental data has been gathered on the performance of flat-plate solar collectors in the United States, Israel and Japan. Flat-plate collectors, due to their simple construction and economy, have been used in experimental solar houses for space heating. Coupled with this solar collector unit, an absorption refrigeration system could be used for air-conditioning.

Commercial absorption refrigeration units use a conventional fuel source and hence are designed to operate at high generator temperatures (250 to 300°F). The thermal efficiency of a flat-plate solar collector decreases very rapidly with increase in the collection temperature. Hence an absorption refrigeration system which can operate at low temperatures is essential in order to obtain satisfactory efficiencies.

## Climatic conditions of India and Pakistan

It is difficult to put into one generalization the climatic conditions of a vast subcontinent such as India and Pakistan. The hot and humid climate of Calcutta and Bombay is less favorable to solar air-conditioning than the hot but dry climate of Delhi, Karachi or Poona. Also, in the latter cities, the monsoon is less severe. A comparison was made of the climates of Delhi, Karachi and Poona. The monthly maximum and minimum temperatures are given in table 1, and the monthly average values of the hourly solar incidences are given in table 2.

<sup>1</sup> Publication No. 72, Mass. Inst. of Tech., Cabot Solar Energy Project.

\* Former Research Associate, Department of Chemical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.

\*\* Research Assistant, Department of Chemical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.

From the point of view of summer as well as winter use of solar energy, New Delhi was chosen for this study.

## Absorption refrigeration system

The choice of a refrigerant-absorbent combination would be a compromise of the ideal characteristics of a refrigerant or an absorbent. The water-lithium bromide system seems to offer the best combination. However, the requirements of a purge pump to remove non-condensable vapors and the existence of low pressure in the evaporator and absorber make this combination less attractive. Löff and Duffie (10) describe a system using Freon-21 and tetra-ethylene glycol dimethyl ether. The experience of a research group at the University of Wisconsin indicated that chemical instability and corrosion problems are associated with organic refrigerant-absorbent combinations. The ammonia-water combination has been used in most commercial applications. Also, a fair amount of thermodynamic data is available on ammonia-water mixtures, such as that by Scatchard (13) or Jennings and Shannon (8). Ammonia-water has been chosen for use in this study.

The air conditioning system (figure 1) essentially comprises a solar energy collection unit, an ammonia-water absorption cooling unit, an air-to-water heat exchanger and a heat storage tank. The main components of the cooling unit are: a generator, a rectifier, a condenser, an evaporator, a chilled water cooling coil and an absorber.

To obtain a quick rise in the collector plate temperature during early morning hours, it is necessary to have low heat capacity of the collector assembly. Hence, after each daily collection cycle the collector must be drained. The storage tank would offer thermal inertia and even though collector outlet temperature may be in the operative range of the generator, it would take some time before the generator could function advantageously. Hence by-pass valves  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $V_4$  and  $V_7$  are provided. After the cycle has been initiated, the collector outlet water can be circulated directly through the generator coil and the return water from the generator coil be sent to the collector by keeping  $V$  open and  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  and  $V_7$  closed.

During periods of low incidence, the hot water storage can be heated by closing  $V_3$ ,  $V_4$  and  $V_7$  and opening  $V_1$  and  $V_2$ . When space heating is required during winter, valves  $V_3$ ,  $V_5$  and  $V_9$  should be opened

Table 1. Weather data

Month	Delhi (28°35'N) (77°12'E)			Karachi (24°53'N) (67°07'E)			Poona (18°32'N) (73°51'E)		
	Max °F	Min °F	Ave °F	Max °F	Min °F	Ave °F	Max °F	Min °F	Ave °F
January	68.7	46.9	56.3	81.0	54.5	67.7	86.1	54.2	70.2
February	76.1	48.4	62.2	83.7	55.4	69.5	90.6	56.2	73.4
March	86.2	61.2	73.7	91.3	64.9	78.1	97.1	62.8	90.0
April	96.1	65.1	80.6	93.6	74.0	83.8	101.1	68.9	85.0
May	103.1	77.0	90.0	98.2	78.5	88.3	99.7	71.9	85.8
June	103.8	83.0	93.4	95.8	83.1	89.5	89.6	72.6	81.1
July	90.0	81.5	85.7	92.2	82.3	87.3	82.8	71.0	76.9
August	92.3	79.0	85.6	90.6	79.5	85.1	81.7	69.6	75.6
September	92.3	76.1	84.2	88.9	76.2	82.5	84.6	68.6	76.6
October	87.0	66.9	77.0	90.5	69.2	80.1	84.1	66.5	75.3
November	81.7	53.8	67.8	90.0	64.7	77.3	86.8	59.4	73.1
December	73.2	48.4	60.8	80.3	55.4	67.9	84.7	53.9	69.3

Source of data: 1. Delhi (Ref. 1); 2. Karachi (Ref. 14); 3. Poona (Ref. 11).

Table 2. Solar incidence on a horizontal surface

Btu per hour per square foot

Month	Place	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	Total
January	Delhi	2	33	85	141	180	197	196	181	140	93	36	3	1 287
	Karachi	4	35	90	141	177	201	201	177	141	90	35	4	1 296
	Poona	21	60	126	187	225	248	245	223	183	122	57	9	1 706
February	Delhi	8	58	127	186	222	237	239	211	176	119	58	10	1 651
	Karachi	8	54	128	183	225	256	256	225	183	128	54	8	1 696
	Poona	19	84	157	218	262	288	290	270	220	162	83	19	2 072
March	Delhi	29	97	166	220	262	283	277	251	210	150	88	20	2 053
	Karachi	22	82	153	211	257	285	285	257	211	153	82	22	2 020
	Poona	34	105	182	244	285	303	298	266	221	157	85	24	2 204
April	Delhi	44	111	179	239	272	292	295	270	225	161	102	40	2 230
	Karachi	36	74	204	211	281	308	308	281	211	204	74	36	2 228
	Poona	44	116	192	254	290	311	298	267	212	153	94	36	2 267
May	Delhi	60	126	192	241	282	302	298	266	221	161	108	49	2 306
	Karachi	34	95	156	209	248	270	270	248	209	156	95	34	2 024
	Poona	47	118	184	245	287	312	320	296	244	191	131	60	2 435
June	Delhi	53	114	180	232	267	284	270	255	218	182	121	61	2 237
	Karachi	60	109	166	209	247	262	262	247	209	166	109	60	2 106
	Poona	48	107	172	230	257	267	268	238	220	104	119	55	2 155
July	Delhi	17	40	67	83	110	98	95	98	93	84	67	40	893
	Karachi	37	82	131	168	198	216	216	198	168	131	82	37	1 664
	Poona	31	69	111	156	183	187	192	174	145	102	69	30	1 449
August	Delhi	34	78	117	165	199	208	204	202	191	134	90	36	1 658
	Karachi	32	85	142	190	227	245	245	227	190	142	85	32	1 842
	Poona	26	62	107	158	197	182	184	187	163	120	67	26	1 478
September	Delhi	22	67	126	174	215	248	262	248	205	138	80	27	1 812
	Karachi	24	81	144	195	232	257	257	232	195	144	81	24	1 866
	Poona	21	70	128	179	234	230	243	238	212	160	88	28	1 831
October	Delhi	10	67	138	198	244	266	265	241	203	134	67	11	1 844
	Karachi	17	67	137	199	245	275	275	245	199	137	67	17	1 880
	Poona	16	74	142	201	249	273	267	244	200	148	79	17	1 910
November	Delhi	3	46	111	169	210	230	227	205	166	108	44	4	1 523
	Karachi	8	48	114	176	220	249	249	220	176	114	48	8	1 630
	Poona	8	59	129	187	231	250	258	233	190	132	61	10	1 748
December	Delhi	0	26	85	143	184	201	202	174	140	87	31	2	1 275
	Karachi	4	36	95	154	195	218	218	195	154	95	36	4	1 404
	Poona	6	55	120	182	227	247	242	224	173	113	53	7	1 649

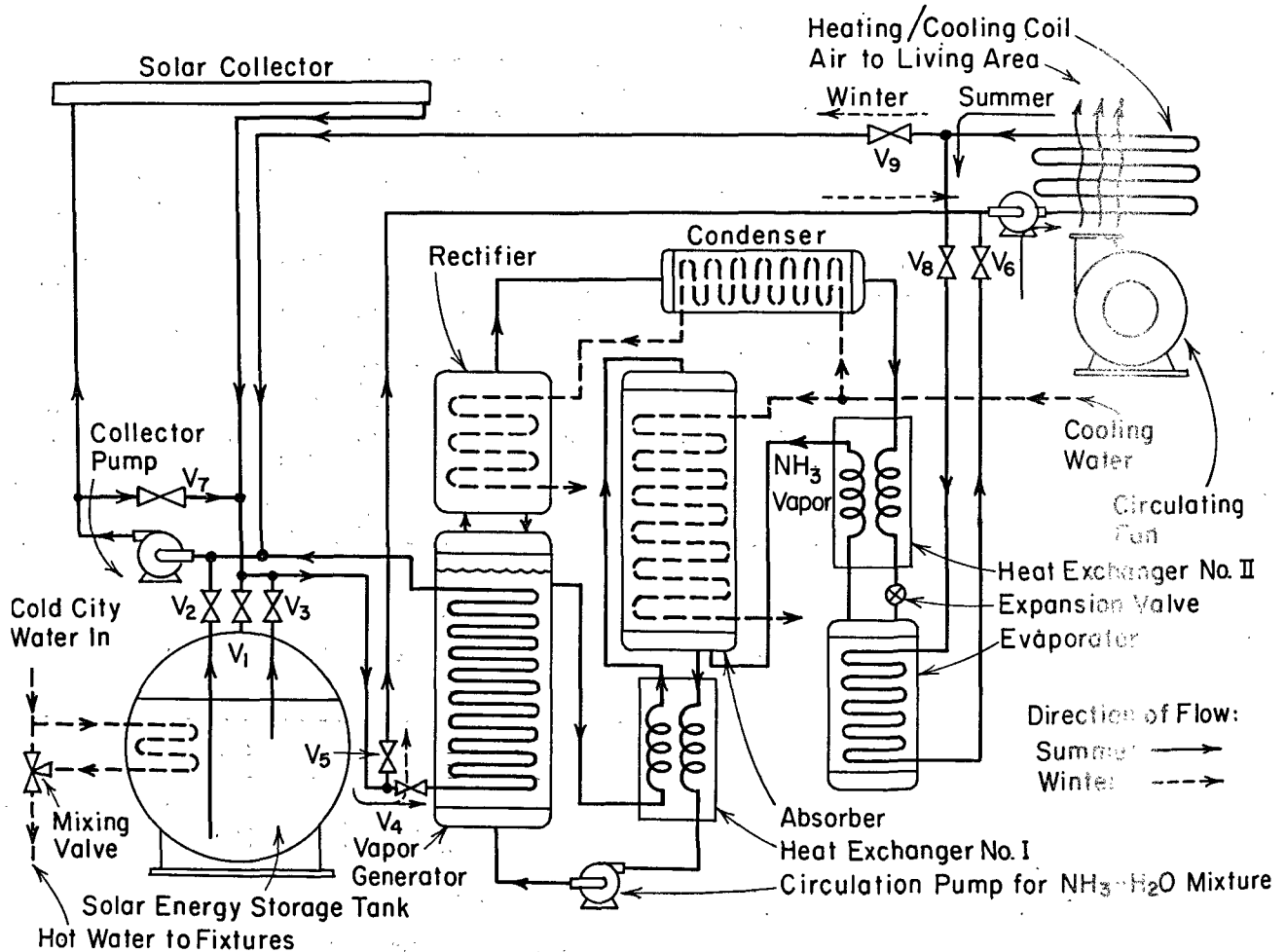


Figure 1. A schematic diagram of the solar heating and air-conditioning system

and  $V_4$ ,  $V_6$  and  $V_8$  should be closed. Domestic hot water is provided by heating the city water to the storage tank temperature by means of a submerged coil.

Data indicate that most of the cooling load occurs when the solar collector output is large. However, some storage is necessary to act as a fly-wheel between supply and demand. A detailed discussion on storage is made in the later part of the paper.

#### Coefficient performance versus generator temperature

The coefficient of performance, hereafter referred to as COP, for an absorption refrigeration system is defined as the ratio of heat input to the evaporator to the heat supplied to the generator plus the work done by the circulation pump. Calculations were made to determine the effect of generator temperature on the COP, keeping the evaporator, the condenser and the absorber temperatures constant. A 90 per cent effectiveness of the heat exchangers was assumed, since preliminary economic calculations showed this to be a reasonable figure. It was observed that the COP increased from zero to its asymptotic

value within a  $10^\circ\text{F}$  rise in the generator temperature. A slight fall in the COP occurs with a further increase in the generator temperature (see figure 2).

For a given absorber and condenser temperature which depends on the city water temperature or cooling tower return, the generator temperature of zero refrigeration (i.e., when the circulation of ammonia liquor becomes infinite) and maximum refrigeration (i.e., when the COP vs generator temperature curve just reaches its asymptotic value) are plotted in figure 3. An absorption refrigeration system with the evaporator at  $55^\circ\text{F}$  would be operable within the range of  $120^\circ\text{F}$  to  $170^\circ\text{F}$  generator temperature at the maximum COP with condenser and absorber in the range of  $84$  to  $100^\circ\text{F}$ . With the evaporator running at  $40^\circ\text{F}$  and the absorber-condenser between  $84$  to  $100^\circ\text{F}$ , the generator temperature would operate in the higher range of  $147$  to  $190^\circ\text{F}$ .

#### Collector performance versus temperature of collection

A flat plate collector similar to the one used in the MIT Solar House IV was taken as a basis. The design is described in detail by Engebretson and Ashar (3).

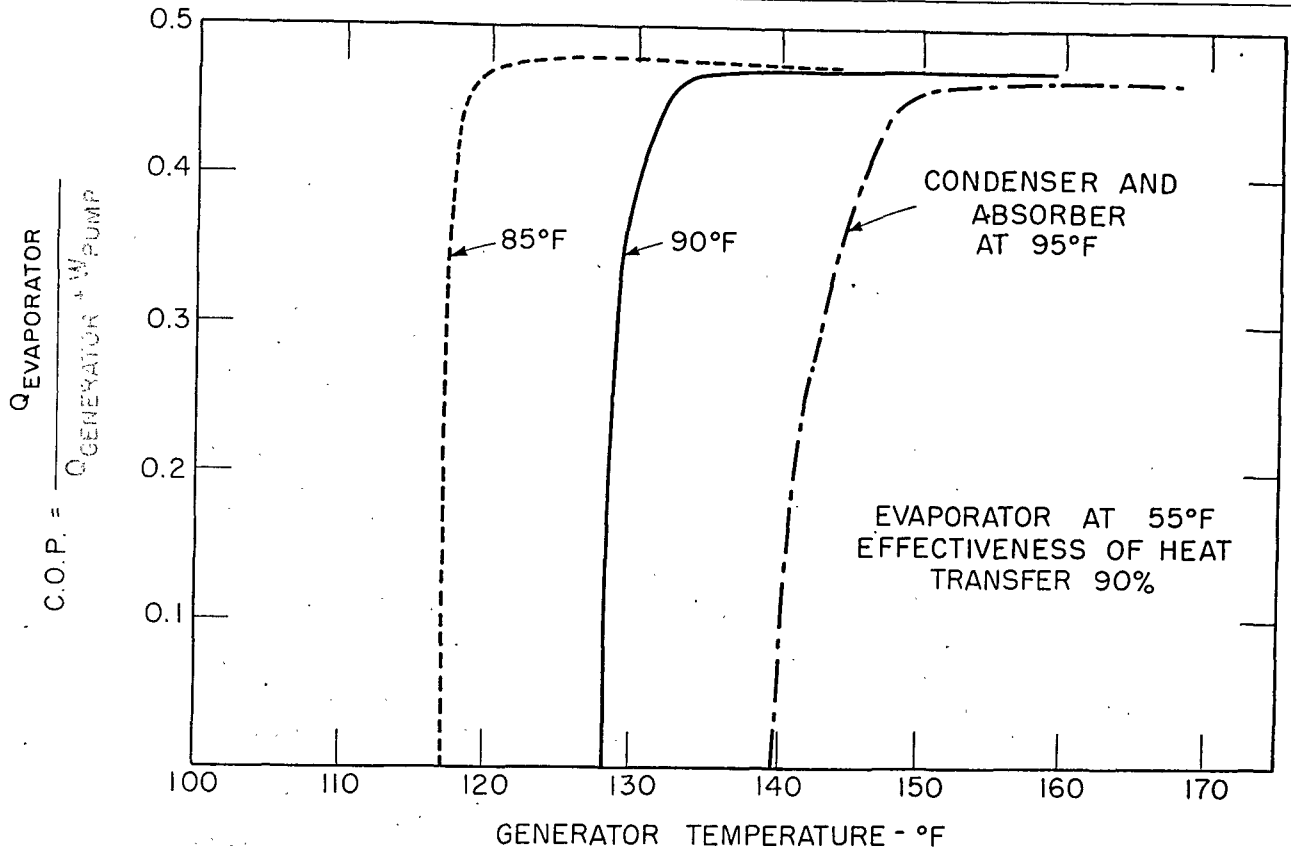


Figure 2. Generator temperature versus coefficient of performance

The useful collection for such a collector at New Delhi in May was calculated using the methods of Hottel and Woertz (6) and Hottel and Whillier (5). The results are plotted in figure 4. It can be observed that the useful collection diminishes rapidly with a rise in the collection temperature. Also, for a given collection temperature the collection efficiency is very low in the early morning hours, compared to the noon hours.

### Optimum temperature of collection

The COP increases up to a certain asymptotic value with increase in the generator temperature. The useful collection decreases with the increase in the collector temperature and consequently the generator temperature. Assuming the temperature of the inlet water to the collector equal to the generator temperature plus 5°F, calculations were made for available refrigeration for a given collector inlet water temperature. The condenser and absorber were assumed to operate at 90°F. The values of available refrigeration versus collector temperature for every hour of the day during the month of May are plotted in figure 5. It can be observed that all the curves reach a peak value at about 140°F. The dotted curve represents the daily total, with a peak value of 544 btu per sq foot per day.

Similar calculations were made for other months and absorber-condenser temperatures. If for the month of May, the absorber-condenser were kept at 85°F, the peak value of available refrigeration would be 589 btu per sq ft per day at a collector inlet water temperature of 125°F. However, if the absorber-condenser were at 95°F, the peak value would be only 525 btu at a collector inlet temperature of 155°F.

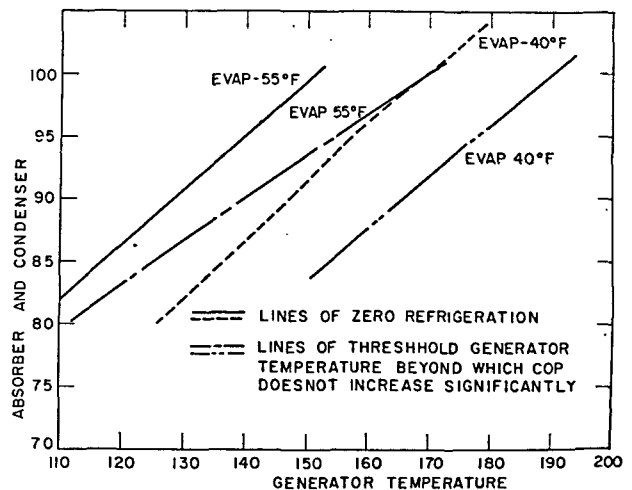


Figure 3. Generator-cooling water temperature relationship for zero and maximum refrigeration effect

### Available refrigeration and cooling load in New Delhi during May

To calculate the cooling load of a modest dwelling in New Delhi, two designs were considered. The details of a low cost house designed by Le Corbusier and his team are given in a Government of India publication (4). The designers estimated the cost of this single story house with living area of 433 sq ft at Rs. 3996/- (or approximately U.S. \$800). A second design considered a two-story, hollow concrete block structure for a modest size family. On the first floor are the living room, dining room, child's bedroom and a kitchen. The second floor contains two large bedrooms, a bath and a study room. The total usable living area is approximately 1600 sq ft. It was assumed that the later design would be better insulated than the former and would be more expensive.

Figure 6 represents the values of average hourly incidence on a horizontal surface, the corresponding useful collection with a collector operating at 140°F and the maximum available refrigeration with the evaporator operating at 55°F and the condenser-absorber at 90°F. The cooling load in the morning hours was found to be smaller than the available refrigeration and in the late afternoon hours the cooling load was larger than the available refrigeration. The difference between the available refrigeration and the cooling load at different hours of the day for both the designs is shown in figure 7.

On the basis of one square foot of collector area the peak value of 84.5 btu per hour per sq ft of

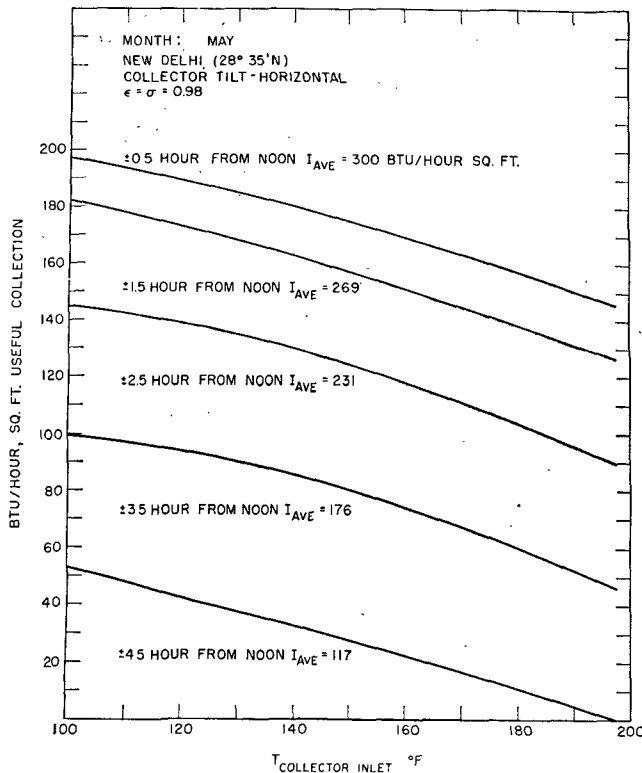


Figure 4. Useful collection versus temperature of collection

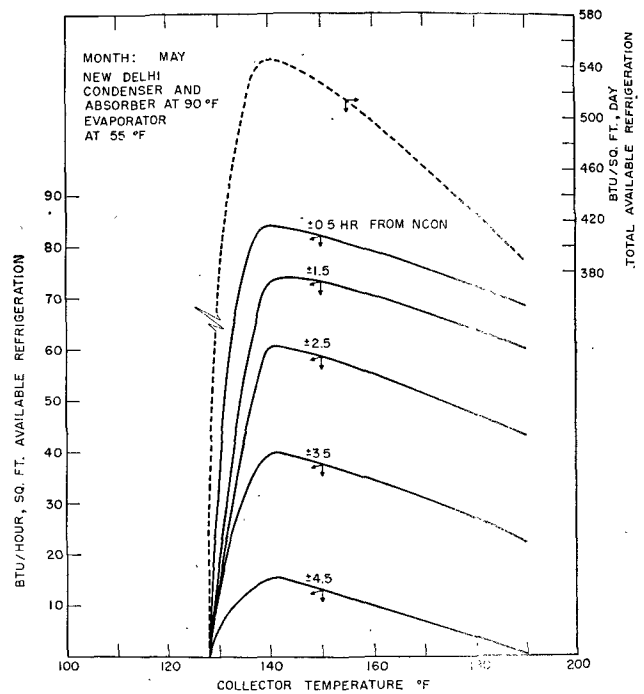


Figure 5. Available refrigeration versus temperature of collection

available refrigeration should be the determining value to decide the maximum capacity of the system, if a liquid ammonia storage is not desired. The area between the available refrigeration and cooling load curves represents the storage capacity necessary in the form of heat of vaporization of liquid ammonia or sensible heat in chilled water if no carry-over storage is needed for the next day. During the month of May, the refrigeration capacity to be stored per square foot of collector area was estimated to be 145 btu per sq ft per day for the low cost house and 190 btu per sq ft per day for the two-story house. The corresponding amounts of liquid ammonia to be stored are 0.3 lb of ammonia per square foot of collector and 0.39 lb of liquid ammonia per square foot of collector respectively. For an alternate arrangement of storing chilled water and assuming 10°F rise in the water stream, 14.5 lb will be necessary in the first case and 19 lb in the later case per sq ft of collector.

One can observe from figure 7 that the cooling load distribution during the day is well spread for the two-story house as compared to the cooling load on the single-story house. The ratios of the roof area to the required collector area are 1.88 and 2.7, and the ratios of the roof-plus-wall area to the required collector area are 6.6 and 6.2, respectively, for the two-story and the single-story houses, during the month of May.

### Annual utilization of solar energy in New Delhi

Calculations were made for the two-story house to determine the heating and cooling load for each month. It was found that November, December,

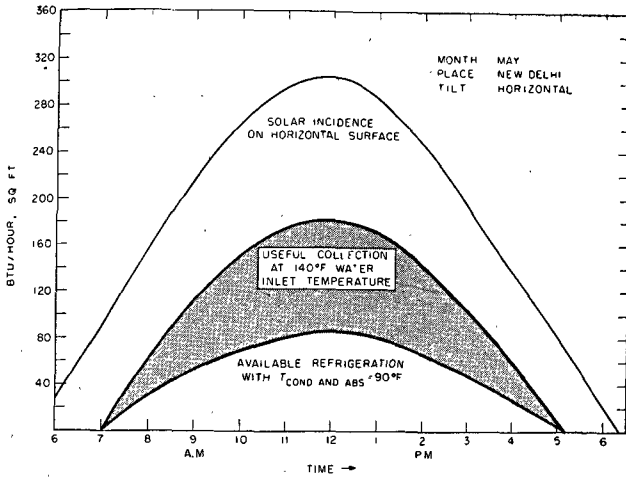


Figure 6. A time variable picture of solar incidence, respective collection and available refrigeration

January and February needed space heating, whereas April, May, June, August and September needed space cooling. In the months of March and October no heating or cooling was needed (see table 3).

The most severe months for air-cooling were found to be May-June and for winter heating were December-January. The major portion of the yearly precipitation occurs in the month of July.

The hot water load was calculated on the assumption of an average consumption of 80 gallons per day. No auxiliary source of energy was included in the system. A storage tank temperature of 140°F was assumed. Experience at the MIT Solar House IV (3) indicated that during the winter season, storage tank temperatures lower than 110°F would consume large amounts of power to transfer a unit of thermal energy to the living area. Furthermore, operating the collector at high temperatures reduced the collection efficiency.

In the present solar house, which is primarily designed for summer comfort, the collector area is over-designed for winter requirements and hence operation of the collector at 140°F is permissible in spite of the low collection efficiency. This eliminates the need of an auxiliary unit further to heat the domestic hot water from the storage tank temperature to 140°F.

On the basis of the foregoing assumptions, calculations were made of the collector area necessary to satisfy the daily requirements during each month. The maximum area was 643 square feet for the month of June. If a 100 per cent solar system is desired, the choice of the collector size lies on the maximum requirement. It is therefore concluded that 650 square feet should be the collection area in the case studied. The additional area of about 100 square feet for months other than June would help build up cold storage for a day with low solar incidence or with a cooling load larger than the average design conditions. The system would not, however, be able completely to air-condition the dwelling during abnormally hot weather in June.

**Economic considerations**

There are many ways to consider the economics of a new source of energy such as solar energy. Apart from the non-tangible considerations like the architectural aspects, aesthetic values, intention to conserve fossil fuels, etc., a solar heating and air-conditioning system should be considered on the basis of the comparative costs of the other means of achieving the same results. There are two bases for comparison. First, using the same type of absorption refrigeration unit for summer air-conditioning and a water-to-air heat exchange unit for winter heating, how much can be saved by the use of solar energy instead of any

Table 3. Calculated monthly heating and cooling requirements and collector output  
Location: New Delhi. House design: Two-storey, 1 600 ft<sup>2</sup> living area

Month	Jan	Feb	March	April	May	June	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1 . . . . .	62	66	78	90	95	94	87	86	84	80	71	63
2 . . . . .	75	75	80	80	80	80	80	80	80	80	75	75
3 . . . . .	1.4	1.0	—	2.1	2.6	3.1	—	1.6	1.8	—	0.6	1.3
4 . . . . .	1 287	1 651	2 053	2 230	2 306	2 237	1 893	1 658	1 812	1 844	1 523	1 275
5 . . . . .	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
6 . . . . .	423	636	859	1 082	1 171	1 081	—	654	770	792	601	434
7 . . . . .	—	—	401	508	544	508	—	304	358	—	—	—
8 . . . . .	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5
9 . . . . .	450	240	106	452	504	643	Rain	594	566	54	176	416

1. Mean outdoor temp., 5 am to 7 pm, °F.
2. Mean house temp., °F.
3. Mean cooling or heating load, 10<sup>3</sup>btu/day.
4. Average solar incidence on a horizontal surface, btu/day-ft<sup>2</sup>.
5. Mean temperature of water inlet to collector, °F.
6. Calculated solar collector output, btu/day-ft<sup>2</sup>.
7. Available refrigeration with evap. at 55°F and abs. and cond. at 90°F btu/day-ft<sup>2</sup>.
8. Hot water load, 10<sup>3</sup>btu/day.
9. Collector area needed assuming no storage, ft<sup>2</sup>.

other conventional source of energy such as oil, kerosene, gas or electricity? Second, if the unit is differently designed, such as a vapor compression unit or a steam jet unit for the summer and panel or other mode of heating during the winter, how much additional capital cost is justified for a solar-powered unit in view of savings in the operating costs?

In New Delhi, the cost of a solar collector covered with two layers of glass is estimated to be Rs. 11/- (or \$2.20) per square foot. Using an annual fixed charge of 10 per cent makes solar heat cost Rs. 6.90/10<sup>6</sup> btu delivered ready for use. The yearly output of a solar collector operating at 140°F and mounted horizontally in New Delhi is estimated to be 0.26 million btus. The retail price of furnace oil with a preheating value of 18 500 btu per lb is Rs. 1/- per gallon or Rs. 12/- per 10<sup>6</sup> btu assuming a combustion efficiency of 70 per cent. Burma-Shell gas in 220 lb packings with a heating value of 21 500 btu per lb is available at Rs. 0.45 per lb. High grade kerosene with a heating value of 20 000 btu per lb would cost Rs. 1.25 per gallon.

The advantage of fossil fuels is the flexibility in use. Of the collector output of 0.26 million btus per year, a sizable fraction is wasted since the energy supply and demand are not well synchronised. A study by Speyer (15) suggests that long term energy storage would be economical only if better and cheaper insulating materials were available or a mode of

storage other than sensible heat developed. From table 3 it can be estimated that approximately 0.16 million btus per square foot of collector per year would be utilized without using a large storage system. On the basis of a solar collector life expectancy of ten years and assuming that the useful heat available is 0.10 million btus per gallon of oil or 0.2 million btus per gallon of kerosene burnt, a cost of Rs. 16/- per square foot is permissible, assuming no difference between the efficiencies of solar heated and oil fired systems.

The relative merits of four methods of refrigeration: vapor compression, absorption, steam jet and dehydration through chemical absorption or adsorption with subsequent evaporative cooling are discussed by Kapur (9) in relation to the Indian climatic conditions. Mr. Kapur recommends the last method for a very hot and dry climate. However, the overall efficiency of such a system would be only 25 per cent if the DB were 105°F and WB 75°F. The efficiency drops to a low of 12.5 per cent with a DB of 100°F and WB of 84°F. For New Delhi during March to September, 44 per cent of the time the wet bulb temperature is above 75°F and the ambient temperature is generally below 105°F. Efficiency of a steam jet system was found to be very low for practical consideration. Hence a cost comparison is made here between an electrically operated vapor compression unit and an absorption system as shown in figure 1.

A vapor compression unit of 5-ton capacity would cost approximately Rs. 15 000/- in New Delhi and would consume 1½ to 2 kWh per ton-hour. Also, if winter comfort and hot water are desired, an additional heating unit must be installed. The savings in power costs at Rs. 0.06 per kWh were estimated to be Rs. 700/- per year by the use of a solar powered unit for a two-story house in New Delhi. Assuming a 10 per cent yearly depreciation, the allowable cost of a 5-ton solar air-conditioning unit would be Rs. 22 000/-, including the cost of 650 square feet of collector. One must appreciate the fact that these costs are only approximations to indicate possibilities of promise offered by solar energy utilization. It is, however, interesting to note that the cost of a mass produced 3-ton Carrier-Bryant unit using ammonia-water is only \$1 000, in the United States or Rs. 5 000/-. It should be further noted that at the present moment a solar collector has yet to be developed which will last for the 10 years over which it is to be depreciated.

## Conclusions

Commercially available absorption units cannot be used for solar air-conditioning due to their high generator temperature operation. Hence a unit operable in the range of 120 to 170°F must be specially designed.

For a hot and dry climate, operation of the evaporator at 55°F instead of the usual level of 40°F favors solar energy utilization. However, for a very dry and hot climate evaporative cooling could

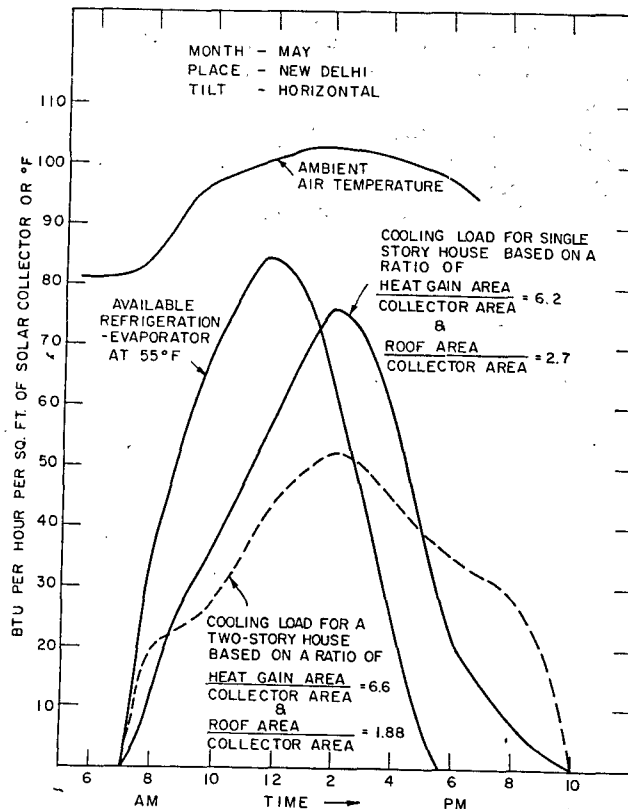


Figure 7. A time variable picture of outside air temperature, cooling load and available refrigeration



be advantageous. For a hot and humid climate like that of Bombay and Calcutta, the use of a solar powered air-conditioning has to await new developments in absorption refrigeration performance.

For maximum year round use of a solar collector, the ratio of the summer requirements to the winter load should be such that the collection area needed to satisfy them should be more or less the same. This can be achieved by a judicious choice of the tilt and a careful design of the heating and air-conditioning units.

Out of the locations considered, New Delhi offers the best promise for maximum utilization of solar energy to provide summer as well as winter comfort in a modest-size house.

The optimum temperature of collection resulting in maximum available refrigeration for a horizontal collector was found to be 140°F. This optimum was based on the assumption of condenser and absorber temperature of 90°F and the generator temperature of 130°F. The optimum varied with the change in the condenser-absorber temperature.

The maximum available refrigeration increased with the decrease in the condenser-absorber temperature. For the month of May in New Delhi with the condenser-absorber at 85°F the available refrigeration was 589 btu/sq ft day and with the condenser absorber at 95°F the available refrigeration was only 525 btu/sq ft day.

Most of the cooling load occurred during the period of high solar incidence and hence very little overnight storage was necessary. For the month of May, the peak value of available refrigeration was 84.5 btu/sq ft collector hour or approximately 55 000 btu per hour for a 650 sq ft of collector.

The maximum cooling load occurred during the late afternoon hours and hence a storage capacity of 145 btu/sq ft day for the single-story house

and 190 btu/sq ft day for the two-story would be essential during May. The solar air-conditioning unit should be designed on the maximum storage needed.

On the basis of maximum collector area required, a 650 sq ft collector for the two-story house was chosen for comparison. Assuming no long term storage of the 0.26 million btus of solar energy collected per square foot per year only 0.16 million btus can be usefully employed.

A flat plate solar collector costing less than Rs. 16/- (or \$3.20) per square foot would be economical in New Delhi area when compared with the cost of fuel oil or kerosene, assuming that it will last long enough to be depreciated over ten years.

Considering the savings realised in the operating costs by use of a solar powered unit instead of an electrically operated vapor compression unit, an additional capital cost of only Rs. 7 000/- (or \$1 400) would be allowable for a solar unit assuming 10 per cent amortization.

A carefully designed solar operated air-conditioning unit using an ammonia-water absorption system appears to be economically feasible in New Delhi. This does not necessarily mean that such a system will be successful and should be built, but further investigation, leading to a more detailed estimate of the advantageousness of this system, is definitely warranted.

### Acknowledgment

The authors wish to express their sincere thanks to the committee and the staff of the MIT Solar Energy Project: Professors H. C. Hottel, L. B. Anderson, A. G. H. Dietz, A. L. Hesselschwerdt and J. Kay as well as C. D. Engebretson, K. Kimura and S. Poretzky for their direct or indirect assistance. Thanks are also due to the Indian Meteorological Department for their promptness in supplying the necessary data.

### References

1. Agarwala, K. S., Local variations of air temperatures at Delhi, *Indian journal of meteorology and geophysics*, 11:276, July, 1960.
2. *American Society of Heating and Air-conditioning Engineers Guide*, Volume 37, 1959.
3. Engebretson, C. D. and Ashar, N. G., Progress in space heating with solar energy, *ASME Paper 60*, A88, 1960.
4. Government of India designs for low cost housing, Ministry of work, housing and supply publication: 48-9, 1954.
5. Hottel, H. C. and Whillier, A., Evaluation of flat-plate solar collector performance, *Trans. of conf. on the use of solar energy*, U. of Arizona 2: 74-104, 1958.
6. Hottel, H. C. and Woertz, B. B., The performance of flat-plate solar heat collectors, *Trans. ASME*, 64:91-104, 1942.
7. Indian Meteorological Department: personal communication Jan. 1961.
8. Jennings and Shannon, The Thermodynamics of Absorption Refrigeration, *Journal of ASRE*: 333, May, 1937.
9. Kapur, J. C., A report on the utilization of solar energy for refrigeration and air-conditioning applications, *Solar Energy IV*: 39, January, 1960.
10. Löf, G. O. G., Chung, R. and Duffie, A., Solar Space Cooling, *Chem. Eng'g Prog.* 55: 74, April, 1959.
11. Raman, P. K., Measurement of the radiation from the sun and sky at Poona in 1935, *Memoirs of the Indian Meteorological Department XXVI*: Part 8.
12. Reti, A. R., The Utilization of Solar Energy for Absorption Refrigeration, S.B. Thesis, MIT Department of Chemical Engineering, 1959.
13. Scatchard, G., Epstein, L. F., Warburton, J., Jr. and Cody, P. J., Thermodynamic properties of saturated liquid and vapor of ammonia-water mixtures, *Journal of ASRE*: 413, May, 1947.
14. Shoaib, Kemal, Design and performance of a solar cooling unit in Karachi, Pakistan, S.M. Thesis, Department of Chemical Engineering, MIT 1960.
15. Speyer, E., Optimum storage of heat with a solar house, *Solar Energy*: 3, No. 4, 1959.

### Summary

A preliminary technical and economic feasibility study has been performed to establish the possibilities of utilizing solar energy for space cooling in India and Pakistan.

The system under consideration consists essentially of a flat plate solar heat collector coupled to a specially designed absorption refrigeration system. A flat plate collector similar to the one used in the MIT Solar House IV was taken as a basis, and its expected performance was calculated using the methods of Hottel and Woertz (6) and Hottel and Whillier (5). The absorption refrigeration unit to be used in this system is especially designed to operate at a lower generator temperature and at a relatively higher evaporator temperature (55°F) than in conventional systems, with very high effectiveness of heat and mass transfer throughout.

It was found that such a system would be technical-

ly feasible in a climate such as the one of New Delhi. Most of the cooling load occurs during the periods of high solar incidence and hence very little overnight storage is necessary. For the month of May the peak value of available refrigeration is 8.5 btu/sq ft of collector-hour.

Such a system would become economically attractive if a solar heat collector could be built to last long enough to be depreciated over 10 years, costing less than about Rs. 16/- (US \$3.20) per square foot. In New Delhi the cost of a solar collector covered with two layers of glass similar to the one used in the MIT Solar House IV is estimated to be Rs 11/- (U.S. \$2.20) per square foot.

Experience from operation of the MIT Solar House IV shows that further development in this direction of improved collector life is necessary to justify use of a 10-year depreciation figure.

## RECHERCHES TECHNIQUES ET ÉCONOMIQUES SUR LES UTILISATIONS DE L'ÉNERGIE SOLAIRE, PLUS PARTICULIÈREMENT EN VUE DE LA CLIMATISATION DES LOCAUX EN INDE ET AU PAKISTAN

### Résumé

Les auteurs ont procédé à des recherches techniques et économiques sur la possibilité pratique d'établir les moyens d'exploiter l'énergie solaire pour la climatisation des locaux en Inde et au Pakistan.

Le système à l'étude est essentiellement constitué par un collecteur d'énergie solaire du type à plaque plate, complété par un système de réfrigération par absorption. Un collecteur à plaque comparable à celui dont fait usage la maison solaire IV de l'institut MIT a été pris comme base de comparaison, et on a calculé son rendement probable en se servant des méthodes de Hottel et Woertz (6) ainsi que de celles de Hottel et Whillier (5). Le groupe de refroidissement par absorption à utiliser dans le cadre de ce système est spécialement étudié pour fonctionner à une température plus basse, au générateur de vapeur, et une température relativement plus élevée, à l'évaporateur (55 °F, ou 13 °C), que dans les systèmes classiques, avec un rendement de la transmission de chaleur et de masse très élevé.

On a établi qu'un tel système serait techniquement réalisable sous un climat comme celui de New Delhi. La majeure partie de la charge imposée au système

de réfrigération se présente pendant les périodes où l'incidence des rayons solaires est élevée, et on peut donc se contenter d'une accumulation très modeste de l'énergie disponible pour les besoins de la nuit. Pour le mois de mai, le maximum absolu de l'énergie disponible pour le refroidissement de l'air est de 8,5 Btu par pied carré de surface de collecteur et par heure.

Un pareil système deviendrait économiquement attrayant si on pouvait construire un collecteur de chaleur solaire susceptible de durer assez longtemps pour être amorti en dix ans, au coût de moins de 16 roupies (3,20 dollars) par pied carré. A New Delhi, les frais d'établissement d'un collecteur d'énergie solaire recouvert de deux couches de verre, analogue à celui qui est en service à la maison solaire MIT n° IV, sont évalués à 11 roupies (2,20 dollars) par pied carré.

L'expérience acquise avec la maison solaire MIT n° IV démontre que de nouveaux perfectionnements dans la voie de l'augmentation de la durée de service utile des collecteurs s'imposent pour justifier l'utilisation d'un chiffre d'amortissement de dix ans.

## ÉTUDE D'UNE MAISON SOLAIRE SAHARIENNE

E. Crausse\* et H. Gachon\*\*

Une habitation saharienne expérimentale doit être construite à Biskra (latitude  $34^{\circ} 51'$  nord, longitude Greenwich  $5^{\circ} 44'$  est, altitude 124 mètres). La conception de cette habitation doit être telle que le chauffage de l'eau et le conditionnement intérieur de l'air en toutes saisons soient réalisés en utilisant l'énergie solaire.

### Conditions naturelles

Biskra est l'oasis située le plus au nord du Sahara. Les caractéristiques naturelles restent en ligne générale celles que l'on observe sur l'ensemble du Sahara. En particulier, son climat est semblable à celui de Ouagla (latitude  $31^{\circ} 54'$  nord, altitude 135 mètres).

*Climat.* — Le climat est caractérisé par :

Une température élevée en été, relativement basse en hiver (figures 1 et 2);

De grandes variations diurnes de température;

Une humidité assez faible et très faible pendant les fortes chaleurs (tableau 1);

Une nébulosité constante et assez faible (tableau 2);

Une insolation forte pendant la saison chaude (en moyenne 80 p. 100) et assez forte pendant la saison froide (70 p. 100) (tableau 3);

Un rayonnement solaire direct assez fort du fait de la pureté de l'air et de sa faible teneur en eau, d'intensité maximum instantanée de  $960 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$ . (figure 3);

Un rayonnement de la voûte céleste qui peut atteindre  $100 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$ . à midi en été;

Un rayonnement réfléchi et émis par le sol à un taux variable suivant la nature du sol, mais élevé;

Des vents assez violents, du fait du manque d'obstacles pour les ralentir, et le plus souvent porteurs de sable et de poussière;

Très peu de pluie.

*Animaux gênants ou nuisibles.* On y trouve des insectes (mouches, guêpes, termites), des arachnides (scorpions, anophèles), et assez peu de serpents (vipères à cornes).

*Effets psychologiques.* L'effet de la chaleur est cause, chez l'individu, de découragement, de lassitude

\* Professeur à la Faculté des sciences d'Alger et Directeur de recherches à l'Institut de l'énergie solaire de l'Université d'Alger, Algérie.

\*\* Professeur à l'École nationale d'Ingénieurs d'Alger et Ingénieur de recherches à l'Institut de l'énergie solaire de l'Université d'Alger, Algérie.

mentale et d'énerverment. L'uniformité et le vide du désert créent l'ennui et la mélancolie.

### Conditions de confort

Les exigences fonctionnelles auxquelles un logement doit satisfaire au Sahara sont assez mal définies. Nous ne traiterons dans notre étude que du niveau de confort correspondant à l'isolement thermique, à la protection contre le rayonnement solaire et à l'étanchéité au vent. Nous laisserons de plus à l'occupant la possibilité de régler le conditionnement de l'air et le niveau d'éclairage.

Le conditionnement intérieur sera défini pendant les périodes de chaleur par une température variant de  $26$  à  $30^{\circ} \text{C}$  et par un degré hygrométrique correspondant variant de  $70$  à  $30$  p. 100, ce qui est caractérisé par une température effective de  $24^{\circ} \text{C}$ .

### Principes directeurs

La protection de la cellule d'habitation contre les rigueurs des phénomènes naturels extérieurs sera assurée dans de bonnes conditions en respectant les principes suivants.

Le plancher du logement sera à deux mètres au-dessus du niveau du sol, de manière à soustraire la cellule habitable à l'effet des éléments denses des vents de sable.

Les parois extérieures de la cellule seront isolées thermiquement et protégées du rayonnement direct et diffus.

Les parois est et ouest seront aveugles.

Tableau 1. Humidité relative

	7 h	13 h	18 h
Janvier . . . . .	71	42	54
Février . . . . .	65	38	45
Mars . . . . .	53	29	31
Avril . . . . .	50	31	31
Mai . . . . .	47	28	30
Juin . . . . .	42	23	25
Juillet . . . . .	40	24	25
Août . . . . .	45	27	31
Septembre . . . . .	51	31	31
Octobre . . . . .	62	35	37
Novembre . . . . .	72	48	54
Décembre . . . . .	72	46	55

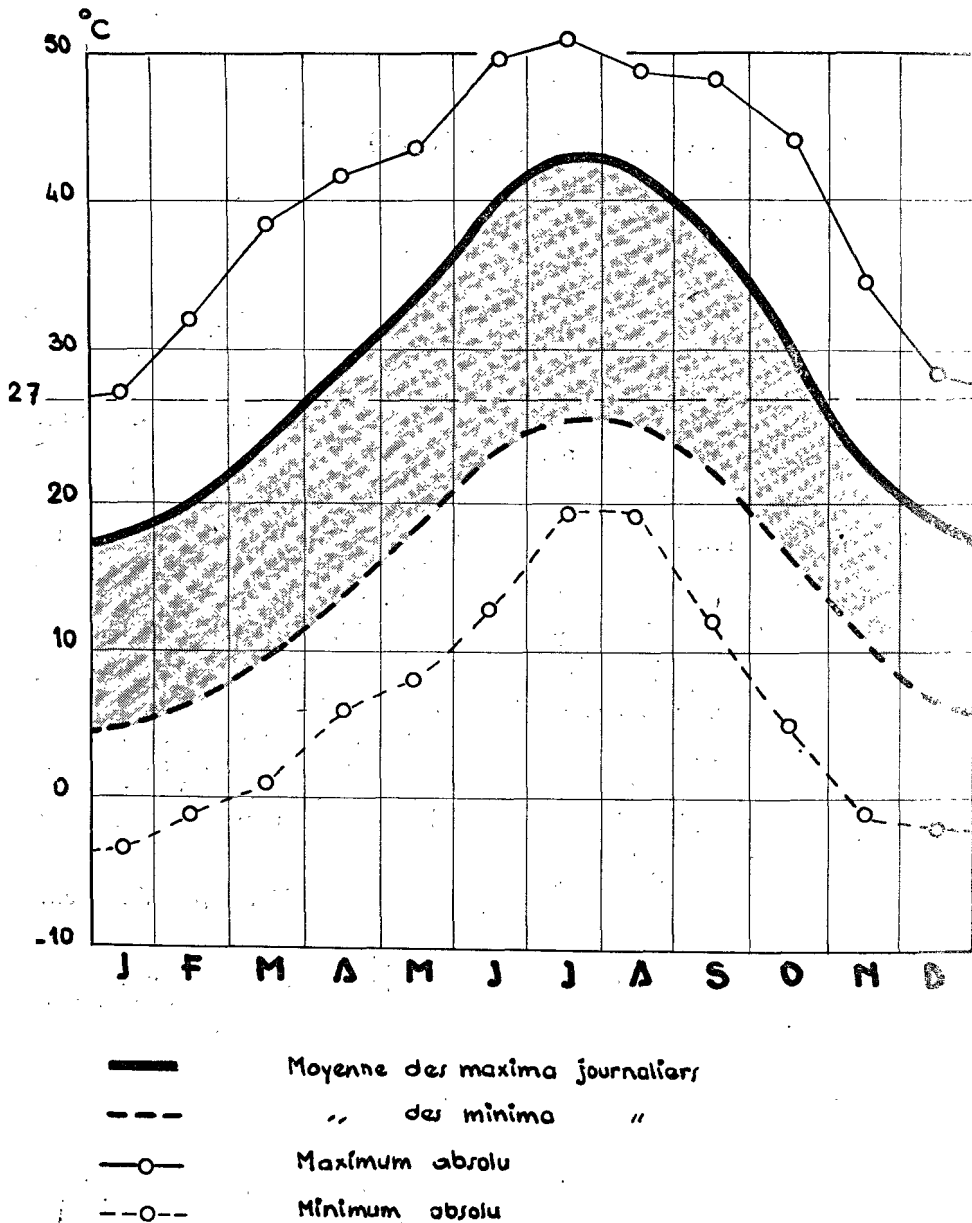


Figure 1. Températures

Les parois nord et sud comporteront ouvertures et loggias.

Les ouvertures seront dans la mesure du possible étanches au vent et à la poussière.

La capacité thermique des éléments intérieurs à la cellule sera faible.

Le conditionnement intérieur de la cellule sera réalisé par convection et par rayonnement de parois dites fonctionnelles. Les parois extérieures verticales et le plafond seront creux et permettront une circulation d'air froid. Le plancher sera chauffant à circulation d'eau. Le renouvellement cyclique de l'atmosphère de la cellule permettra d'amener le degré hygrométrique à un taux convenable.

La circulation de l'air dans les parois s'effectuera par tirage à l'aide d'une cheminée solaire.

L'abaissement de la température de l'air circulant dans les parois fonctionnelles sera obtenu par le procédé classique de l'humidification.

Le chauffage de l'eau pour les besoins domestiques et le chauffage intérieur seront assurés en captant l'énergie rayonnée par le soleil et en accumulant cette énergie sous forme de calories dans des accumulateurs à eau.

### La maison solaire

#### DESCRIPTION SOMMAIRE (figures 4 et 5)

Cette maison se présente sous forme d'un parallépipède à base carrée de 81 m<sup>2</sup> porté par un socle en maçonnerie et coiffé d'une toiture avec cheminée solaire.

**Tableau 2a. Nébulosité**  
 (en dixièmes de ciel couvert)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Biskra . . . . .	2,5	2,6	2,6	2,6	2,6	2,2	1,2	1,6	2,6	2,5	2,7	2,8
Ouargla . . . . .	2,1	2,2	2,2	2,4	2,3	1,6	0,6	0,9	2,1	2,6	3,0	2,6

*Note.* — Il ne s'agit que de nébulosité totale, c'est-à-dire fraction de ciel couvert par les nuages quels que soient leur nature et leur niveau.

**Tableau 2b. Nombre de jours de ciel clair**  
 (N = 0) à 7 h, 13 h, 18 h

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Biskra . . . . .	5,0	3,8	3,4	3,3	3,2	5,7	12,3	9,1	3,4	3,9	3,6	3,0
Ouargla . . . . .	11,1	9,8	9,2	8,5	10,2	14,2	20,9	18,5	10,5	8,8	8,4	8,2

Le socle en maçonnerie est constitué par quatre murs nettement en retrait par rapport aux parois du logement. Ces murs délimitent un volume servant de sas entre l'extérieur et la cellule habitable, et permettent de plus de surélever le logement.

La toiture est à quatre pans constituée par des feuilles planes métalliques peintes en noir destinées à capter le maximum d'énergie rayonnée par le soleil. Elle comporte en son centre une cheminée assurant le tirage de l'air circulant dans les parois fonctionnelles de refroidissement.

La cellule habitable est aménagée intérieurement de manière à créer une ambiance agréable. Les lignes sont simples, les parements clairs et nets. L'organisation intérieure tient compte des exigences fonctionnelles de chaque pièce. Le maximum de confort domestique est recherché.

Le plafond est constitué par deux parois distantes de 10 cm. La paroi inférieure de faible épaisseur est en éternit, la paroi supérieure de 10 cm d'épaisseur est en un matériau isolant, le polystyrène expansé ( $\lambda = 0,02$  kcal/m h. °C).

Les panneaux verticaux bordant la cellule se composent de trois parois. Les parois intérieures et extérieures sont en éternit de faible épaisseur. La paroi intérieure est de teinte claire, la paroi extérieure est de teinte foncée. La paroi intermédiaire de 5 cm d'épaisseur est en polystyrène expansé.

L'assemblage du plafond, des panneaux verticaux et de la toiture est réalisé de manière à créer le circuit suivant : plafond, panneaux (circuit descendant intérieur, circuit ascendant extérieur) toiture et cheminée. Ce circuit d'air continu et étanche est alimenté à partir de deux prises disposées sur les parois nord et sud au niveau du plafond et dissimulées par les loggias. L'air est conduit, après avoir été dépoussiéré et humidifié, par deux gaines qui convergent au centre du plafond.

Le plancher est porté par des solives en profilés métalliques. L'aire du plancher est constituée par une dalle en béton armé qui repose sur une couche de polystyrène expansé de 10 cm d'épaisseur. Une tubulure de circulation d'eau est prévue dans la dalle. Cette tubulure constitue le circuit de chauffage. Elle est reliée à un réservoir de 5 000 litres fortement calorifugé.

Des bouches d'aération sont ouvertes sur le circuit d'air au niveau du plafond et au niveau du plancher.

## CONDITIONNEMENT

### Réfrigération

Le véhicule utilisé pour le transport du froid est l'air. Ce dernier, prélevé à l'ambiance extérieure que nous supposons caractérisée par une température de 44 °C et par un degré hygrométrique de

**Tableau 3. Insolation**  
 (Durée en heures et fraction d'insolation en pourcentage)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Biskra												
Heures . . . . .	7,2	8,4	8,9	9,3	10,1	11,1	12,2	11,7	9,6	8,2	6,6	6,6
Pourcentage . . . . .	72	79	75	72	72	77	85	87	77	73	64	67
Ouargla												
Heures . . . . .	7,9	9,4	9,9	10,4	10,8	10,7	12,4	11,5	10,1	9,0	7,8	7,6
Pourcentage . . . . .	77	83	83	81	78	75	89	86	81	79	74	76

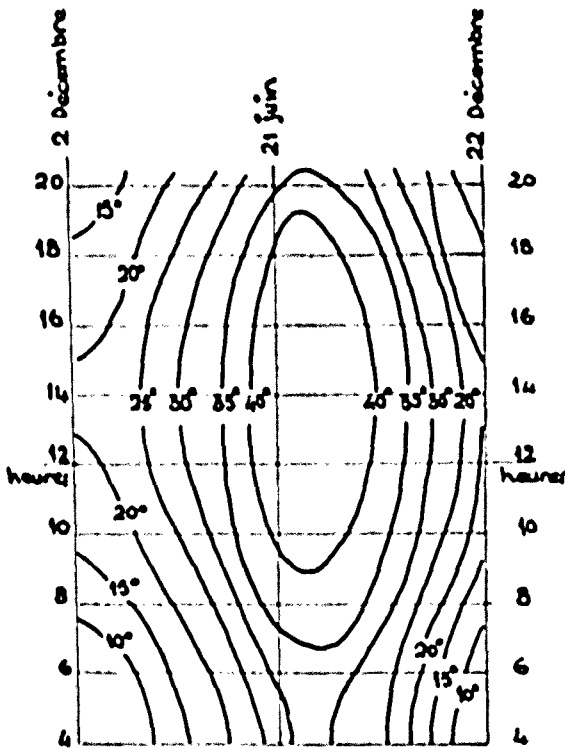


Figure 2

20 p. 100 (ceci correspond sensiblement aux conditions rencontrées pendant les journées les plus chaudes de juillet et d'août aux environs de 16 h.), emprunte le circuit défini précédemment. Il passe d'abord dans une chambre de dépoussiérage, puis dans un humidificateur de type commercialisé. Là se réalise l'opération la plus importante quant à l'efficacité du conditionnement. En effet, en évaporant une certaine quantité d'eau, l'air se charge en humidité et perd un nombre défini de calories, ce qui abaisse sa température.

Si nous considérons que la transformation est isentropique, compte tenu des possibilités des humidificateurs, nous pouvons espérer un abaissement de température de 16 °C pour une augmentation du degré hygrométrique de 60 p. 100, ce qui nous conduit à une température de 28 °C et à un degré hygrométrique de 80 p. 100.

Cet air refroidi circule dans les parois fonctionnelles. Ces dernières sont constituées de manière à favoriser l'échange thermique avec l'intérieur et à le freiner avec l'extérieur. L'air transmet par convection et conduction des frigories aux parois et se charge de calories. Sa vitesse de circulation dans les parois est conditionnée par l'équipement thermique à réaliser, à savoir que, compte tenu de la température intérieure désirée dans la cellule, du flux thermique à évacuer en provenance de la cellule et ayant pour origine les occupants, les appareils électro-ménagers et les défauts d'étanchéité de la cellule à l'air et à

la chaleur, et du flux thermique traversant les parois extérieures, il convient qu'en aucun point du circuit la température de l'air ne soit supérieure à la température de l'ambiance intérieure de la cellule. Cette vitesse sera assez faible, de l'ordre de 0,2 m/s, pour limiter les pertes de charge dans le circuit.

L'écoulement de l'air dans les parois est réalisé par le fait que la colonne descendante est de l'air froid et humide et que la colonne montante est de l'air dont la température est amenée progressivement à un niveau supérieur à celui de la température extérieure.

L'élévation de la température dans la colonne montante est obtenue en captant l'énergie rayonnée par le soleil sur toutes les faces verticales et sur la toiture de l'habitation à l'aide d'éléments plans en éternit ou en feuille métallique de teinte foncée. Ces éléments constituent la paroi extérieure du « circuit tirage » et jouent le rôle d'échangeur thermique et de « parradiant ».

L'échangeur thermique que constitue l'ensemble de ces éléments est assuré de fonctionner pendant toute la durée de l'insolation, ce qui nous autorise à espérer un fonctionnement purement solaire du conditionnement pendant une bonne fraction de la journée.

Une cheminée d'une hauteur de 2 m est nécessaire pour assurer un tirage efficace.

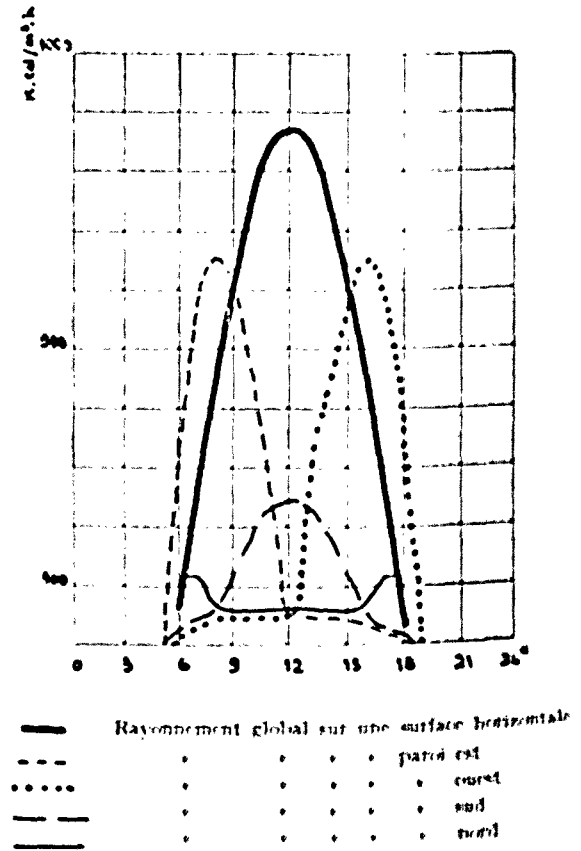


Figure 3. Énergie rayonnée

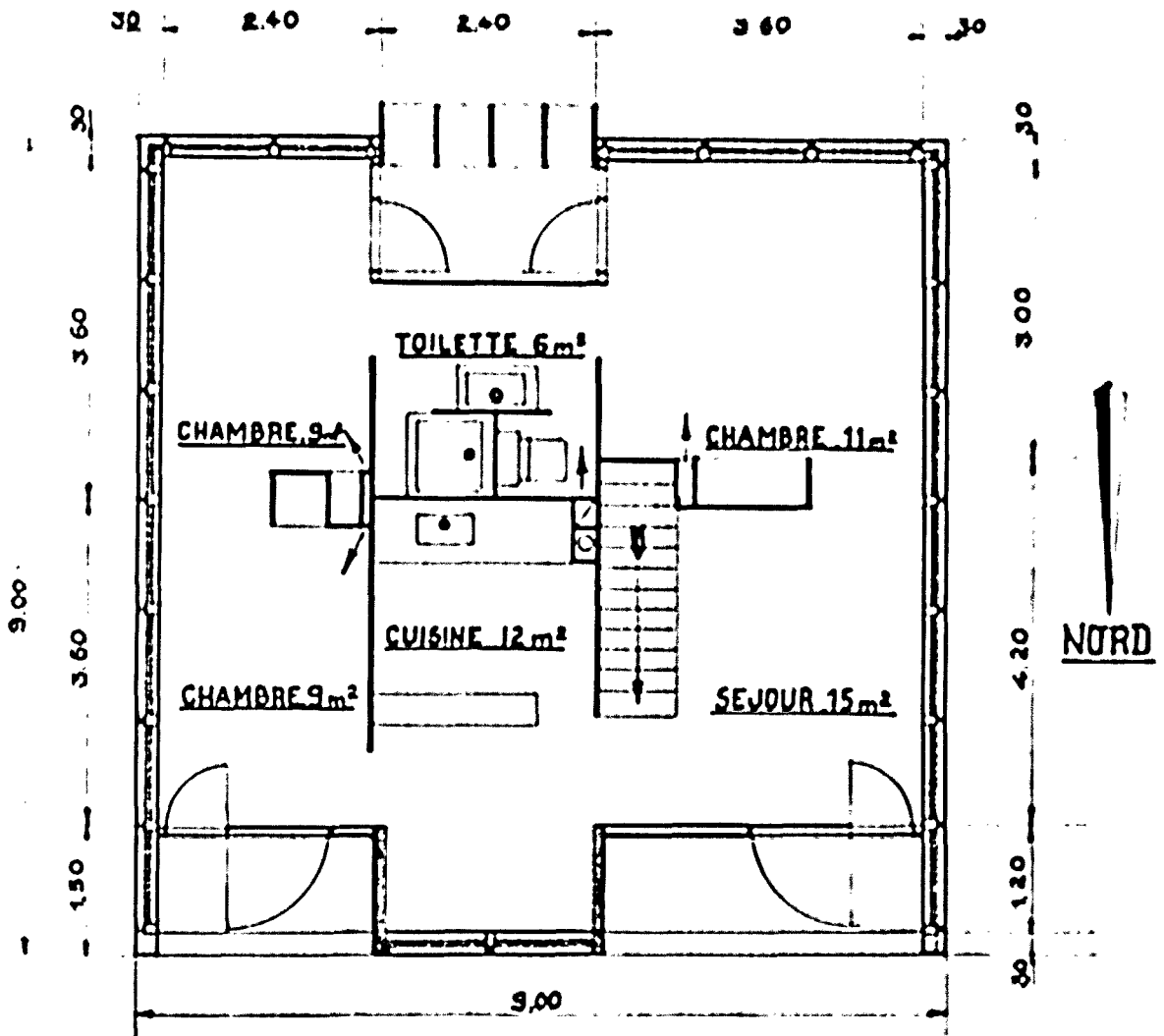


Figure 4. Plan de la maison

*Renouvellement et humidification de l'atmosphère intérieure*

Le renouvellement et l'humidification de l'atmosphère intérieure sont réalisés par prélèvement simultané d'air humide et frais dans le circuit de refroidissement d'une part, et d'air sec et chaud à l'ambiance extérieure d'autre part.

Le dosage de ces prélèvements pourra être réglé par l'habitant depuis les prises d'air sur lesquelles seront montés des filtres. Pour assurer l'écoulement de l'air à travers ces filtres, des ventilateurs de faible puissance sont prévus. L'évacuation de l'air vicié s'effectuera au niveau du plancher dans le « circuit tirage ».

*Chauffage*

Le véhicule utilisé pour le transport de la chaleur est l'eau. La paroi fonctionnelle est la dalle du plancher à l'intérieur de laquelle est réalisé un circuit d'eau (tubulure en acier).

L'eau est chauffée dans un insolateur « héliothermique » situé à proximité de l'habitation, et stockée dans un accumulateur calorifique d'une contenance de 5 000 litres. La circulation de l'eau dans le plancher est assurée à l'aide d'une pompe électrique de faible puissance.

L'insolateur a été séparé de l'habitation elle-même dans le but de conserver des circuits avant leur propre échangeur, ceci peut permettre une expérimentation plus aisée de chacun des circuits.

Le chauffage est assuré pendant une durée de 24 heures dans les conditions extérieures les plus défavorables.

**Analyse de quelques réalisations semblables dans le monde**

Il faut citer tout d'abord la maison solaire réalisée par Thomason<sup>1</sup>. Cette maison est une solution au problème du conditionnement solaire. Elle est de

<sup>1</sup> Article paru dans la revue *Soleil Temps* n° 8, octobre 1966.

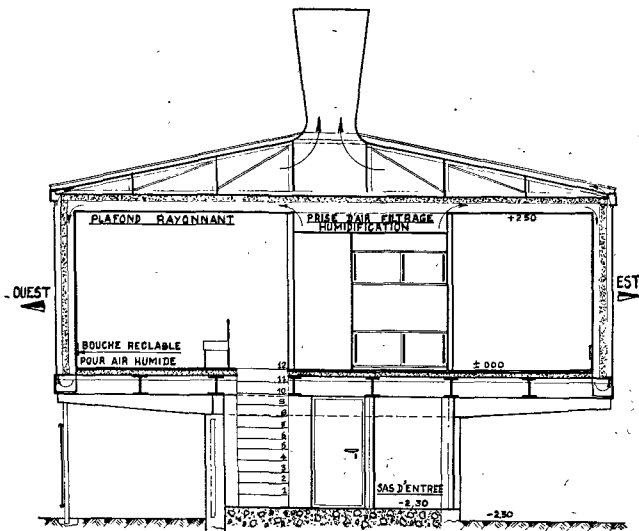


Figure 5. Coupe en élévation de la maison

conception traditionnelle. L'équipement permettant d'assurer le conditionnement se compose d'un insolateur constitué par le pan sud de la toiture, d'un évaporateur constitué par le pan nord de la toiture, de deux réservoirs servant d'accumulateur et d'échangeur, l'un de 1 000 litres, l'autre de 6 000 litres entouré de 50 tonnes de moellons. L'eau circulant par gravité dans l'insolateur est recueillie dans les réservoirs montés en série. Le premier de 1 000 litres sert aux besoins domestiques, le second de 6 000 litres sert d'échangeur et d'accumulateur pour le chauffage des locaux par air pulsé à travers les moellons. La réfrigération est obtenue en isolant le grand réservoir du circuit eau chaude et en le transférant sur un circuit refroidi par évaporation sur le pan nord de la toiture. Ce procédé est extrêmement intéressant, mais il est bien évident qu'il ne saurait convenir au climat du Sahara.

Le principe de climatisation par humidification utilisant la circulation d'air dans les parois creuses a déjà été utilisé au Sahara dans les régions de Colomb-Béchar et de Reggane par le Génie militaire français. Ces réalisations sont dues pour une grande

part au colonel Roubinet. Initialement, le procédé consistait à accroître la résistance thermique d'une paroi double semi-lourde en y faisant circuler de l'air refroidi à une certaine vitesse. Le procédé actuel mis au point par le colonel Roubinet fait l'objet d'un brevet d'invention. La climatisation est obtenue par rayonnement des parois refroidies par évaporation d'eau à son contact. La circulation de l'air est assurée par gravité d'une part, puisque l'air se charge d'humidité en descendant, et par tirage solaire le long des parois extérieures d'autre part; un ventilateur d'appoint contribue à créer une vitesse de circulation suffisante, nécessaire à une évacuation rapide des calories. L'emploi de parois humides rayonnantes pose des problèmes délicats de constitution, d'étanchéité et d'entretien.

Dans l'étude que nous avons entreprise, les parois sont sèches et polies, le véhicule porteur de froid est l'air, les échanges thermiques sont réalisés entre les parois et l'air par convection. La vitesse de circulation du fluide est faible (0,2 m/s). Les pertes de charge dans le circuit sont donc réduites. Aussi en période d'insolation normale le fonctionnement est entièrement solaire.

De plus, à l'inverse des habitations sahariennes de construction traditionnelle, celle-ci se caractérise par une faible inertie thermique des parois extérieures. Cette particularité, qui pourrait être un grave inconvénient, est valable par le fait que le conditionnement peut être total et permanent, et offre les possibilités d'un équilibre thermique rapide.

Le présent projet a été réalisé avec le souci d'avoir des circuits simples et directs; en conséquence, aucun système de récupération des frigories n'est prévu, et de ce fait la consommation d'eau est assez importante (20 à 30 l/h).

Les panneaux verticaux de la toiture sont démontables, dans le but d'essayer des parois de différentes natures, et en particulier des parois transparentes en double épaisseur en verre.

L'intérieur de l'habitation comportera un tableau d'appareils de mesure avec enregistreur, afin de tirer de l'exploitation normale le maximum de renseignements.



## STUDY OF A SAHARAN SOLAR HOUSE

(Translation of the foregoing paper)

E. Crausse\* and H. Gachon\*\*

An experimental Saharan dwelling is to be built at Biskra (34° 51' N. lat., 5° 44' E. long.; elevation, 124 m). This dwelling is to provide year-round solar water-heating and air-conditioning.

### Natural conditions

Biskra is the northernmost oasis of the Sahara. In general, the natural conditions are the same as those observed throughout the Sahara. More specifically, its climate resembles that of Ouargla (31° 54' N. lat.; elevation, 135 m).

*Climate.* The climate is characterized by the following:

Elevated summer temperatures and relatively low winter temperatures (figures 1 and 2);

Great daily temperature range;

Fairly low relative humidity; very low in very hot weather (table 1);

Constant and very low cloudiness (table 2);

High percentage of possible sunshine during the hot season (average, over 80 per cent) and rather high during the cool season (70 per cent) (table 3);

Rather high insolation owing to the purity of the air and to its low water-vapour content (instantaneous maximum 960 kcal/m<sup>2</sup> — figure 3);

Sky radiation may reach 100 kcal/m<sup>2</sup> h in summer;

Radiation reflected and reradiated by the ground varies with the nature of the ground, but in any case is high;

Rather strong winds, owing to the lack of obstacles that would retard them. Usually they carry sand and dust;

Very little rain.

*Annoying or harmful fauna.* Insects (flies, wasps, termites, scorpions, anopheles mosquitoes) and very few snakes (horned vipers) are found.

*Psychological effects.* The heat induces discouragement, mental lassitude and enervation. The uniformity and emptiness of the desert cause ennui and melancholy.

### Conditions of comfort

The functional requirements for a dwelling in the Sahara are very poorly defined. We shall here consider only the level of comfort corresponding to thermal insulation and to protection against solar radiation and wind. We shall also make provision for regulation of the air conditioning and illumination level by the occupant.

The air conditioning will hold the temperature between 26 and 30°C and the relative humidity between 70 and 30 per cent, a range characterized by an effective temperature of 24°C.

Table 1. Relative humidity

	7 h	13 h	18 h
January . . . . .	71	42	54
February . . . . .	65	38	45
March . . . . .	53	29	31
April . . . . .	50	31	31
May . . . . .	47	28	30
June . . . . .	42	23	25
July . . . . .	40	24	25
August . . . . .	45	27	31
September . . . . .	51	31	31
October . . . . .	62	35	37
November . . . . .	72	48	54
December . . . . .	72	46	55

\* Professor, Faculté des sciences d'Alger, and Research Director, Institut de l'énergie solaire de l'Université d'Alger, Algeria.

\*\* Professor, École nationale d'Ingénieurs d'Alger, and Research Engineer, Institut de l'énergie solaire de l'Université d'Alger.

### Guiding principles

Protection of the dwelling unit, or habitable cell, against the natural phenomena outside it will be reliably ensured by obeying the following principles.

The floor of the dwelling will be 2 m above the ground level, to eliminate the influence of the heavier particles carried by sandstorms.

The outside walls of the dwelling unit will be insulated and protected from both direct sun and sky radiation.

The east and west walls will be blind.

All openings and loggias will be in the north and south walls.

The openings will be as wind and dust-tight as possible.

The specific heat of the materials of interior elements will be low.

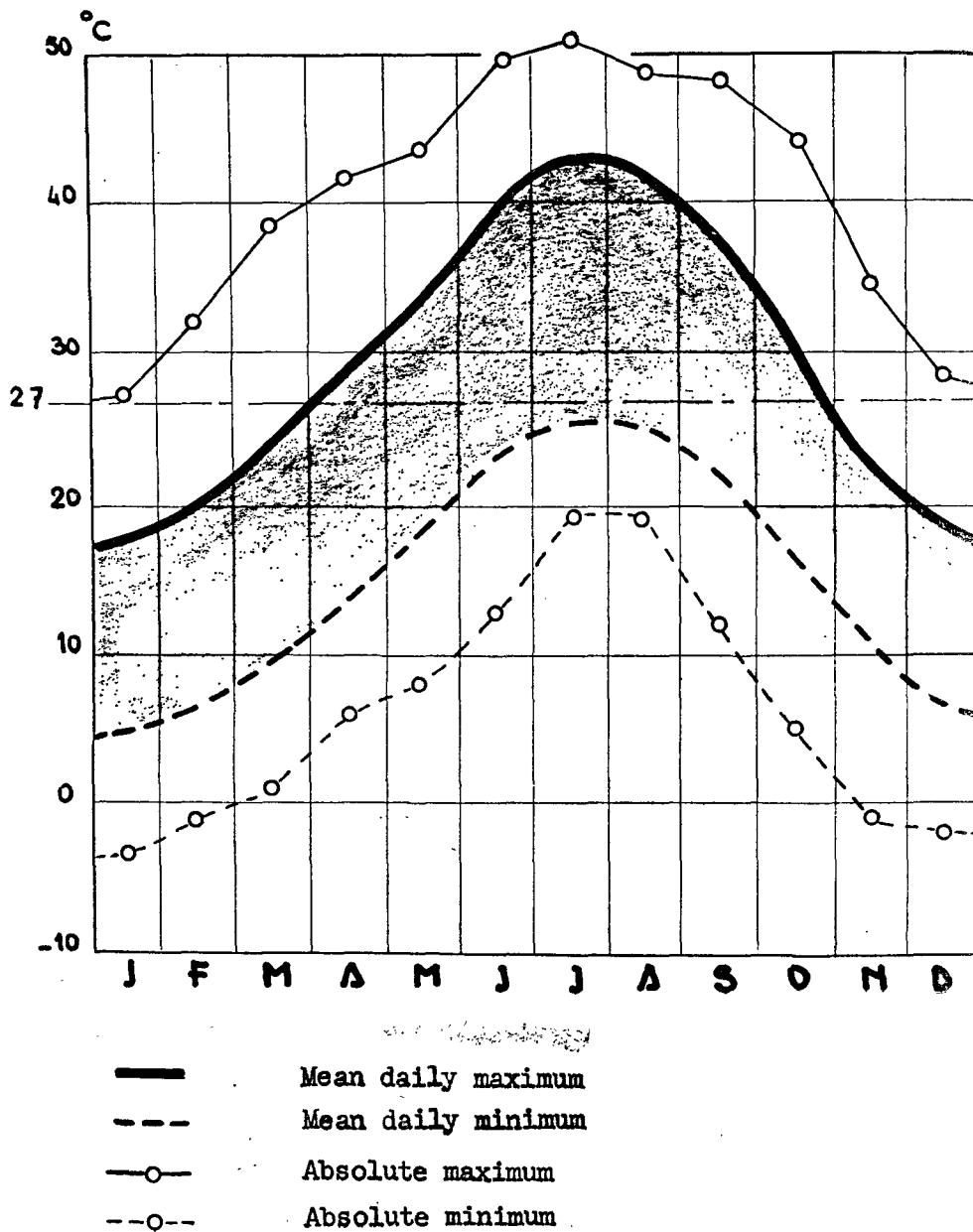


Figure 1. Temperatures

The internal air conditioning of the unit will be accomplished by means of convection and by reradiation of what are called functional walls. The exterior vertical walls and the ceiling will be hollow and permit the circulation of cold air. The floor will be a heating element, heated by water circulation. Cyclical air renewal will hold the relative humidity at suitable levels.

The air will be circulated in the walls by the draught from a solar chimney.

The temperature of the circulating air in the walls will be lowered by the conventional method of humidification.

Water for domestic use will be heated, and provision made for interior space heating, by collecting

radiant solar energy and storing it in hot-water storage tanks.

### The solar house

#### BRIEF DESCRIPTION (figures 4 and 5)

The house is a parallelepiped. Its 81 m<sup>2</sup> base rests on a masonry footing. The roof has a solar chimney.

The masonry footing consists of four walls with an appreciable set-back relative to the walls above the ground. These walls bound a space which serves as an air-lock between the external atmosphere and the dwelling unit. It also permits location of the dwelling unit at a level above the ground.

Table 2a. Cloudiness  
(Expressed in tenths of the total sky covered)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Biskra . . . . .	2.5	2.6	2.6	2.6	2.6	2.2	1.2	1.6	2.6	2.5	2.7	2.8
Ouargla . . . . .	2.1	2.2	2.2	2.4	2.3	1.6	0.6	0.9	2.1	2.6	3.0	2.6

Note: Only the values for the total cloudiness are given, i.e., the fraction of the sky covered by clouds of all kinds and at all levels.

Table 2b. Number of days with clear sky  
(N = 0 at 7 h, 13 h, 18 h)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Biskra . . . . .	5.0	3.8	3.4	3.3	3.2	5.7	12.3	9.1	3.4	3.9	3.6	3.0
Ouargla . . . . .	11.1	9.8	9.2	8.5	10.2	14.2	20.9	18.5	10.5	8.8	8.4	8.2

The roofing consists of four panels made of flat sheet metal painted black, designed to collect the maximum radiant energy from the sun. It has a chimney at the centre to provide a draught for the air circulation in the functional cooling walls.

The interior lay-out provides a pleasant environment. The lines are simple, and the decoration follows clear and distinct motifs. The interior is so organized as to take account of the functional demands of each room. Every effort has been made to provide maximum domestic comfort.

The floor consists of two levels, 10 cm apart. The lower level is not very thick and is of eternite; the upper level, 10 cm thick, is made of an insulating material, polystyrene foam ( $\lambda = 0.02$  kcal/m h °C).

The vertical panels bounding the unit are composed of three walls. The thin inner and outer walls are of eternite. The inner wall is of light colour, the outer of dark. The intermediate wall, 5 cm thick, is of polystyrene foam.

The ceiling, vertical panels and roof are so assembled as to create the following circuit: ceiling, panels (interior descending circuit, exterior ascending circuit), roof and chimney. This continuous and air-tight circuit is fed by the two air intakes on the north and south walls at ceiling level, which are concealed by the loggias. After dust-removal and humidification, the air is conducted through two ducts converging at the centre of the ceiling.

The floor is carried by joists made of metal shapes. The area under the floor is paved with reinforced concrete on a bed of polystyrene foam, 10 cm thick. A piping system for water circulation is provided in this pavement, constituting the heating circuit. It is connected to a heavily insulated 5 000-litre tank.

The air circuit has air intakes at the levels of the ceiling and floor.

## AIR CONDITIONING

### Cooling

Air is used as the cooling medium. The air is taken from the outside, which is assumed to be at 44°C and to have a relative humidity of 20 per cent. (These are substantially the conditions during the hottest days of July and August at about 16 h). The air enters the circuit described above, first passing into a dust-removal chamber, then into a commercial-type dehumidifier, where the operation most important for the effectiveness of the air conditioning takes place. By evaporating a certain quantity of water here, the air is humidified and loses heat, thus lowering its temperature.

If we consider the transformation to be isentropic, taking the possible performance of the humidifiers into account, we may expect a fall of 16°C in the temperature for an increase of 60 per cent in the

Table 3. Sunshine  
(Duration in hours and percentage of possible sunshine)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Biskra												
Hours . . . . .	7.2	8.4	8.9	9.3	10.1	11.1	12.2	11.7	9.6	8.2	6.6	6.6
Percentage . . .	72	79	75	72	72	77	85	87	77	73	64	67
Ouargla												
Hours . . . . .	7.9	9.4	9.9	10.4	10.8	10.7	12.4	11.5	10.1	9.0	7.8	7.6
Percentage . . .	77	83	83	81	78	75	89	86	81	79	74	76

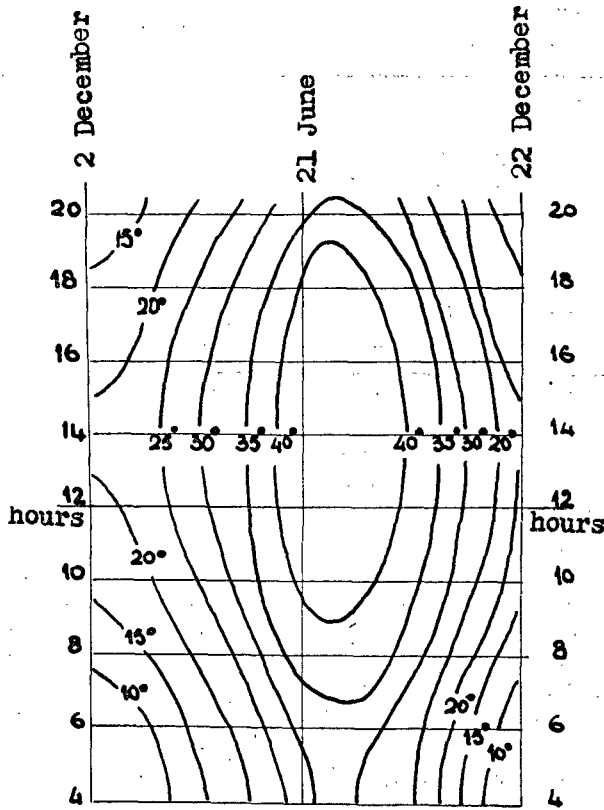


Figure 2

relative humidity, giving us air at 28°C and 80 per cent relative humidity.

This cooled air circulates through the functional walls. These walls are so designed as to promote heat exchange with the interior and decrease it with the exterior. The air transfers cold to the walls by convection and conduction and itself takes up heat there.

The speed of the air circulating in the walls is determined by the thermal equipment provided. That is, taking account of the desired temperature in the unit, and the heat flux to be removed, which originates in the unit and is due to the occupants, the electrical household equipment, the lack of airtightness and heat-tightness of the unit, and to the heat flux across the outside walls, the temperature of the circulating air must not at any point of the circuit be higher than the atmosphere temperature inside the dwelling unit. The air circulation speed will be rather slow, of the order of 0.2 m/s, to limit the losses of cold in the circuit.

The air flow through the walls is due to the fact that the descending column is of cold and humid air, while the rising column of air at a temperature that has progressively been brought up to a level above that of the outside air.

The temperature rise in the ascending column is obtained by collecting energy radiated by the sun on all the vertical faces and on the roof of the dwelling, by means of flat, dark-coloured eternite and

sheet-metal elements. These elements constitute the outer wall of the draught circuit and play the part of heat exchanger and radiant wall.

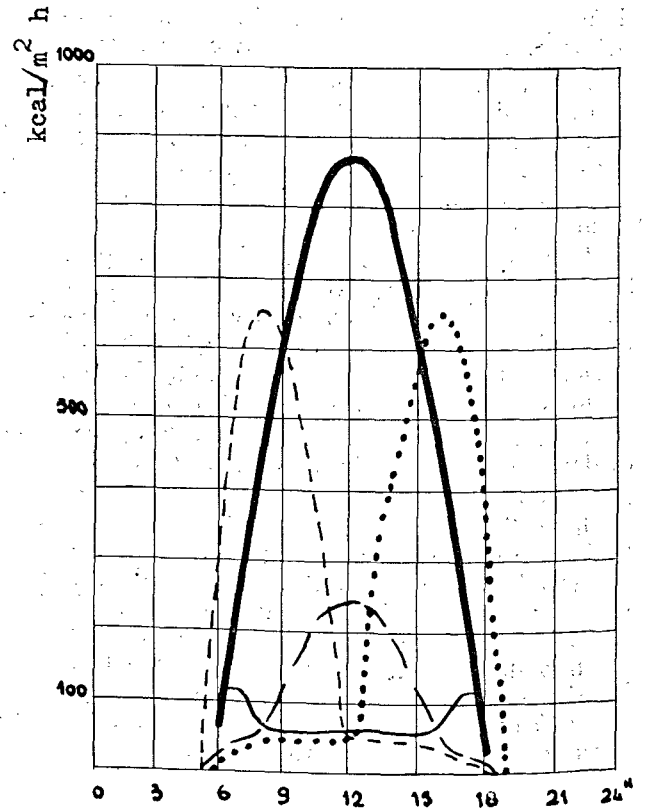
The heat exchanger constituted by the entire assembly of these elements must necessarily operate during the entire time of exposure to sunshine. This gives us every right to expect purely solar operation of the air conditioning system during a good part of the day.

A chimney 2 m high is necessary to provide a good draught.

*Renewal and humidification of the interior atmosphere*

The interior atmosphere is renewed and humidified by simultaneous introduction, into the cooling circuit, of humid cool air, and of dry hot air from the external atmosphere.

The occupant can regulate the volume of both these flows from the air intakes, on which filters will



- Total radiation on a horizontal surface.
- - - Total radiation on an East wall.
- ..... Total radiation on a West wall.
- · - · Total radiation on a South wall.
- — — Total radiation on a North wall.

Figure 3. Radiation

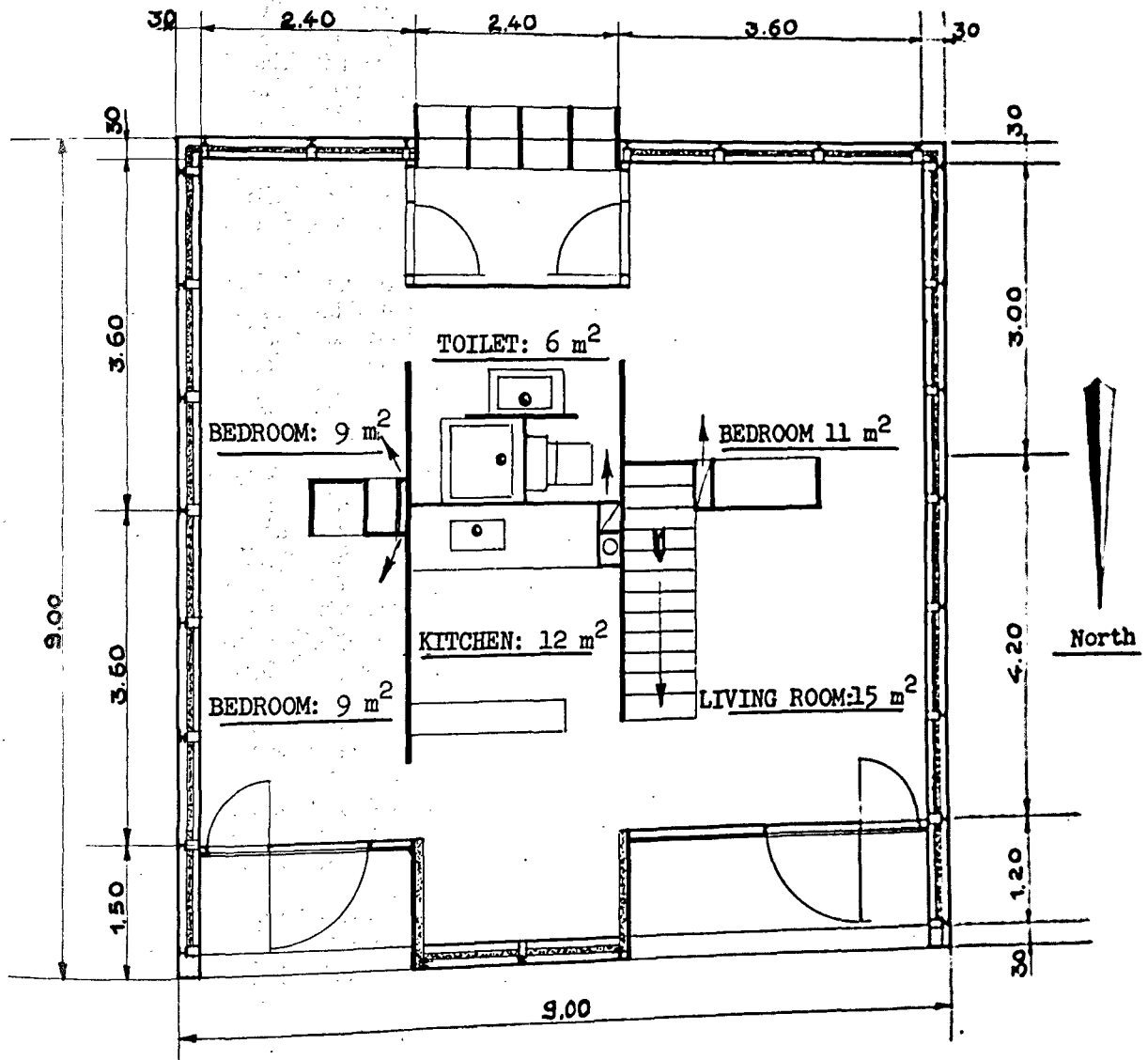


Figure 4. Plan of the house

be mounted. Low-power fans are provided to force the air through these filters. The foul air is exhausted at floor level through a "draught" circuit.

### Heating

The heat-transfer medium used is water. The functional wall is the paving of the floor, within which a water circuit is provided (steel piping).

The water is heated in a "heliothermic" collector near the house, is stored in a 5 000-litre insulated tank, and is circulated in the floor system by a low-power electric pump.

The collector has been placed outside the house itself in order to have circuits with their own heat exchangers, to facilitate experimentation on each of the circuits.

Under the most unfavourable external conditions, heating is ensured during a period of 24 h.

### Analysis of several similar developments throughout the world

Mention should first be made of the solar house designed by Harry E. Thomason.<sup>1</sup> This house is a solution of the problem of solar air-conditioning. It is traditional in concept. The air-conditioning equipment consists of a solar collector, formed by the south side of the roof, an evaporator, formed by the north side of the roof, and two tanks of 1 000 and 6 000 litres capacity, respectively, used as heat accumulator and heat exchanger, and surrounded by 50 tons of rubble. The water circulating by gravity in the collector is received in tanks assembled in series. The first tank, 1 000 litres, provides water for domestic uses; the second, 6 000 litres, serves as heat exchanger and heat accumulator for space heating by means of air forced through the rubble.

<sup>1</sup> Article in *Solar Energy*, No. 4, October 1960.

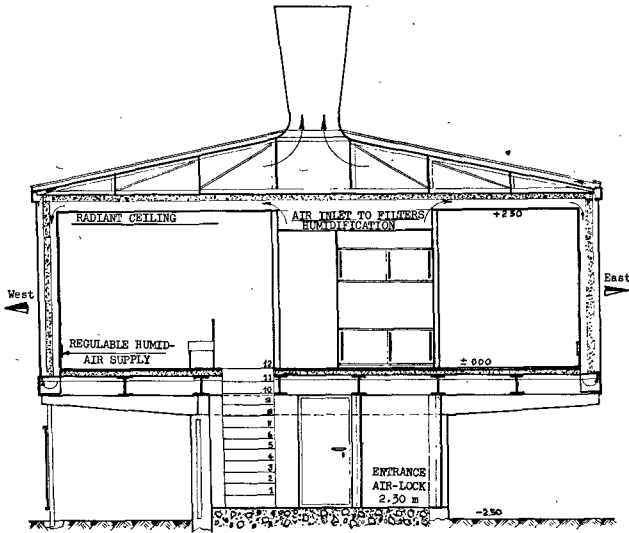


Figure 5. Elevation of the house

Refrigeration is obtained by insulating the large tank of the hot-water circuit and transferring it to a circuit cooled by evaporation on the north side of the roof. While this method is extremely interesting, it would obviously be unsuitable for the climate of the Sahara.

The principle of air conditioning by humidification, utilizing the circulation of air in hollow walls, has already been employed in the Sahara by the French Army Engineers in the regions of Colomb-Béchar and Reggane. These developments have been largely due to Colonel Roubinet. The method consisted initially in increasing the thermal resistance of a medium-weight double wall by circulating cooled air through it at a certain speed. The present method, which has been developed by Colonel Roubinet, has

been patented. Air conditioning is obtained by irradiation of the walls cooled by evaporation of water on contact with it. The air circulation is due both to gravity, since the air takes up humidity as it descends, and to solar draught along the exterior walls. An auxiliary fan helps to produce the circulating air speed sufficient and necessary for rapid heat removal. The use of moist, radiating walls poses delicate problems of design, air-tightness and maintenance.

In the present study, the walls are dry and polished. The cold transfer medium is air, and the heat exchange is accomplished by convection between the walls and the air. The speed of circulation of the fluid is low (0.2 m/s). The losses of pressure in the circuit are thus decreased. Also, in periods of normal sunshine, the operation is entirely solar.

Moreover, in contrast to Saharan dwelling houses of traditional design, this new type is characterized by outer walls of low thermal inertia. This peculiarity, which could be a serious disadvantage, is of value, owing to the fact that the air conditioning can be complete and permanent and enables thermal equilibrium to be rapidly reached.

In the present project, particular care has been devoted to simplicity and directness of the circuits. Consequently, no system of recovering the cold is provided, thus making the water consumption rather high (20-30 l/h).

The vertical panels of the roof may be disassembled, for the purpose of testing walls of various kinds, especially transparent walls made of glass of double thickness.

The interior of the dwelling is provided with a panel of instruments with recorder, in order to obtain the maximum amount of information from normal operation.

## PROSPECTS FOR SOLAR AIR CONDITIONING IN AUSTRALIA

Norman R. Sheridan \*

Australia has vast areas which urgently need population and development, e.g., Australia has about 40 per cent of its land area in the tropics but only about 4.0 per cent of its population. Even by Australian standards, the north is underpopulated and by world standards no part of Australia is really crowded.

It has been stated by Macpherson (1), who reported on "Environmental problems in tropical Australia" for the Commonwealth Government, that airconditioning "would provide the most important single contribution to increasing the output of effective work and improving the health and morale of those living in these areas". Thus it is thought that airconditioning could substantially assist development of the underpopulated areas by ameliorating the undesirable influences of the environment.

Since power is needed for any new developments and airconditioning would greatly increase the power demand, the possible sources of power should be considered. Coal is still plentiful in Australia and there are vast untouched reserves. Coal is probably not suitable, however, for a basic fuel in an area which is unlikely to ever support a reasonable density of population. Oil is a more versatile fuel, particularly for use in smaller powerplants. It is

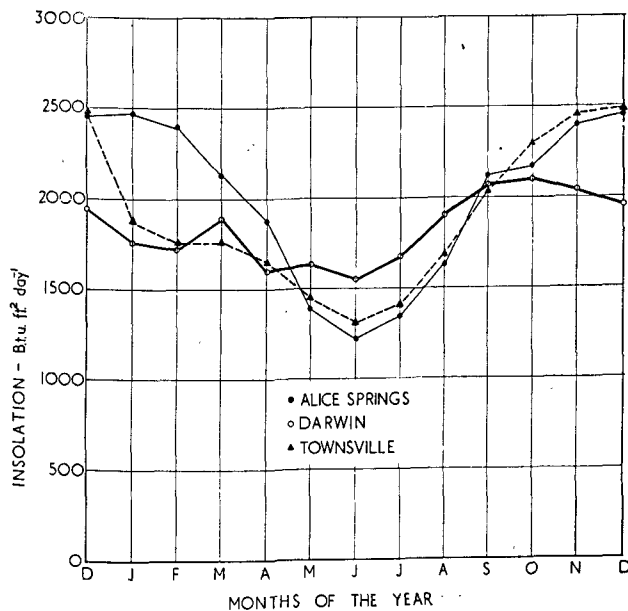


Figure 1. Average daily insolation throughout the year for tropical radiation stations in Australia

\* University of Queensland, Brisbane, Australia.

also costly because the areas of interest are remote from the sea ports.

As much of the area in question is liberally supplied with sunshine, it seems logical to enquire whether the solar source could provide the energy requirements. Use of the sun's energy involves no transport cost fuel and could prove to be economic. The main arguments in favour of using solar energy for airconditioning are:

(a) Since solar radiation is one of the largest airconditioning loads, the supply of energy matches the energy requirement.

(b) Solar energy when absorbed by practical devices is of low availability in the thermodynamic sense. Since airconditioning only requires a change of ambient temperature of the order of ten to fifteen degrees Fahrenheit, it would seem that solar energy could be suited to the application.

### Climatic considerations

In considering climatic conditions for solar airconditioning, there are two requirements:

(a) To define areas where airconditioning is desirable.

(b) To check that the incoming radiation will be sufficient to meet the airconditioning loads.

(a) It is difficult to define areas where airconditioning is justified. It may be possible to give boundaries to areas where the climate is uncomfortable but just how much a particular climate will reduce a person's work output is not so easily determined. Thus it is hard to say that a certain expenditure on airconditioning will be recovered by an increase in work output.

Much work has been done to determine comfort conditions for man but these conditions are still subject to much debate. The best results are those determined for the particular areas in question as two of the main variables are the amount of clothing socially acceptable and the normal level of activity.

The author has collated available information and defined a comfort area for the Australian tropics (2). The main features of this are that the upper dry-bulb temperature is 85°F and the upper wet-bulb temperature is approximately 73°F. Places exceeding these conditions for more than 5 per cent<sup>1</sup> of the time are

<sup>1</sup> The 5 per cent figure is taken as it represents a significantly long period. By taking the 10 per cent level, the temperature limit is lowered only 1 or 2 degrees in most cases.

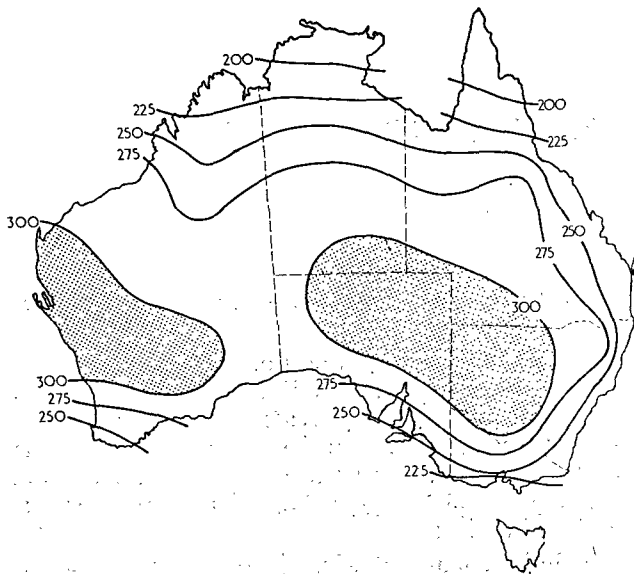


Figure 2. Sunshine for the summer months in Australia. (Isohels give the average number of sunshine hours per month)

taken as having climates that are severe enough to warrant consideration of airconditioning.

(b) The systematic collection of radiation data for Australia was not attempted before 1953 when a network of eight stations was established (3). Previously, some data was available from the Mount Stromlo Observatory. Three of the stations, Darwin, Townsville and Alice Springs, are in tropical or near tropical parts of Australia and average values of the daily insolation on a horizontal surface are shown for each month in figure 1. These are averages over a three year period, 1953-1955, for which the records are published (4). It will be noticed that the insolation for the months of January and February at the coastal stations of Darwin and Townsville is only about 70 per cent of that at the inland station of Alice Springs. Since these months are likely to be critical for solar airconditioning, the inland locations, which are less affected by the cloud cover causing these low values of insolation, would probably prove more suited to solar equipment.

The small number of radiation recording stations does not enable the general pattern of Australian radiation to be visualised. It has been suggested that sunshine hours, as recorded with the Campbell-Stokes instrument, can be used for predicting total insolation (5). Since the sunshine in the hottest months is of most importance for airconditioning, isohels<sup>2</sup> have been plotted in figure 2 giving the average monthly sunshine hours for the five months of November, December, January, February and March (6). If it is allowed that the inclination of the absorbing surface be optimised for each locality, the isohels should define areas receiving approximately the same radiation on the optimised surface. The

<sup>2</sup> An isohel is a line joining localities receiving an equal number of sunshine hours.

greatest amount of sunshine for these summer months is received outside the tropics in western New South Wales and in the south-west of Western Australia. The maximum average number of sunshine hours per month represents about 76 per cent of the possible number of hours.

### Areas of Australia suited to solar airconditioning

Figure 3<sup>3</sup> shows areas (unshaded) which exceed the suggested comfort zone maximum of 85°F for more than 5 per cent of the time.<sup>4</sup> It is thought that provision of airconditioning for these areas could be considered as the conditions are probably severe enough to reduce efficiency especially for the more highly skilled operations. Comparison with figure 4<sup>5</sup> will show that this area exceeding 85°F design dry bulb temperature is also largely uninhabited, having less than 1.0 person per square mile. Much of this country is capable of supporting a somewhat higher population (though it will never be highly populated due to water shortage over much of the area) and it is suggested that a deterrent to development is the physical hardship of the climate. Thus airconditioning in relieving this hardship could be considered as a development expense.

Areas having design wet-bulb temperatures in excess of 73°F are shown in figure 5<sup>6</sup> as the unshaded region. It will be noted that all these areas also exceed the design dry-bulb temperature of 85°F.

Having decided on the possibility of airconditioning, it is pertinent to see just what power can be

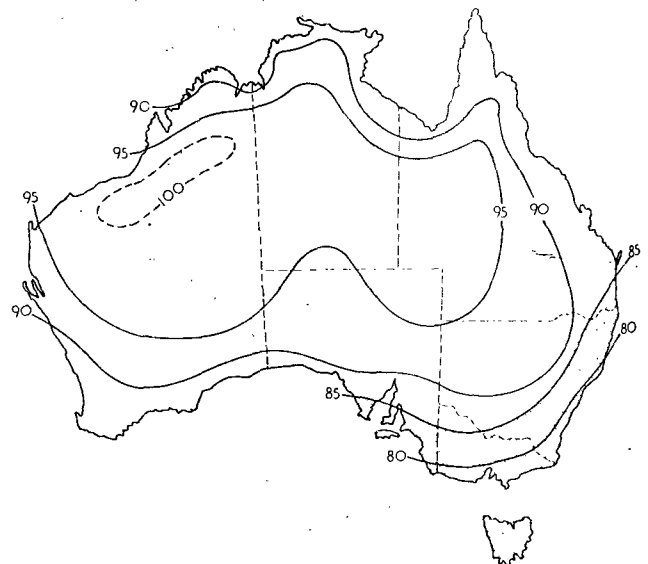


Figure 3. Isotherms of design dry-bulb temperature in °F

<sup>3</sup> Figures 3 and 5 were prepared from the graphical data of (7).

<sup>4</sup> The temperature, which is exceeded for not more than 5 per cent of the time is called the Design Temperature. It can be applied to wet-bulb and dry-bulb temperatures.

<sup>5</sup> Figure 4 was prepared from data in reference 8.



used to operate the equipment. Electricity is the usual source of power, if freely available. The extent of the major electricity distribution lines is shown on figure 4. As could be expected, these major lines do not reach out to the areas of low population density. In addition, electricity is generated at concentrations of population in the sparsely populated area with oil engines or other internal combustion engines.

However, the price per kilowatt-hour is proportionately higher than is paid by consumers of the main grids, e.g. figure 6<sup>6</sup> shows the cost of electricity per kW hr sold in Queensland depending on the number of consumers connected to the supply authority. It will be noticed that the price is as high as 12 pence per kW hr in small consumer areas and this gives every incentive to develop other forms of energy.

A form of airconditioning that has low demands on power is evaporative cooling and this could be considered as an alternative to any solar airconditioning proposals. It is generally considered that evaporative cooling can be reasonably successful in areas where the design wet-bulb temperature does not exceed 68-70°F and where the design dry-bulb temperature is high enough. Thus the inland areas below the 70°F design wet-bulb isotherm on figure 5 may be suitable for evaporative cooling.

The areas most suited to solar airconditioning can now be defined as on figure 7. The most suited area (unshaded) is one where the design dry-bulb temperature exceeds 85°F, where evaporative cooling is unsuited, where there is ample sunshine and where electricity is not available or is expensive. The area possibly suited to evaporative cooling is considered marginal as evaporative cooling would probably be a better investment. An area to the



Figure 4. Population density and electricity distribution (Unshaded area has less than 1 person per square mile. Only main electricity transmission lines are shown)

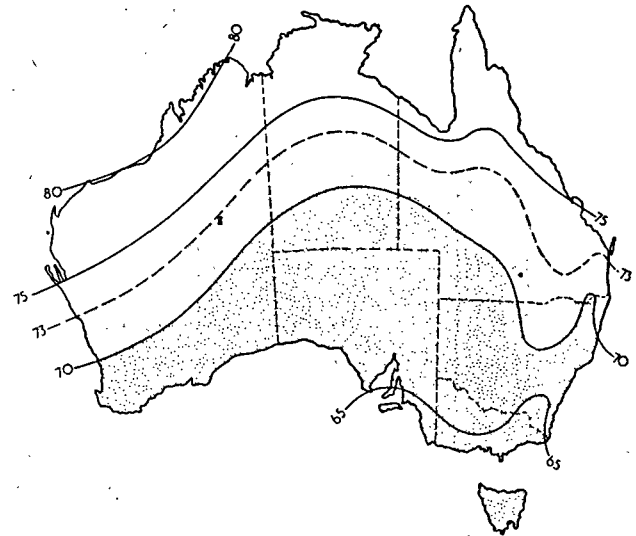


Figure 5. Isotherms of design wet-bulb temperature in °F

north has been considered marginal because the sunshine hours in summer are less than two-thirds of the maximum for Australia. A further area where electric power is cheap is not considered to be of immediate interest.

### Applications for solar airconditioning

Solar airconditioning is not limited to any particular type of airconditioning. However, in the area most suited to solar airconditioning there is not likely to be great industrial development because of a fuel shortage and the great distance to ports. The economy of the area is expected to be largely based on primary products and minerals. These are produced mainly by outdoor work to which airconditioning is not readily applicable. It would thus seem that the biggest potential for airconditioning is in the domestic field.

There are other reasons for concentrating interest in solar airconditioning on domestic applications:

(a) Indoor requirements for domestic purposes are not as stringent as demanded for industrial or commercial applications. The activity in the home is usually light to sedentary and higher temperatures may be more suitable than in cases with hard manual labour. In addition, there is probably no need to supply standby plant for the odd occasion when solar energy would be unable to meet the demand. There is no product to spoil, no employees or customers to satisfy.

(b) While economic justification of domestic airconditioning must be difficult, this is perhaps the only opportunity to provide outdoor workers and workers in such places as smelters with any relief from the climate. The securing of a comfortable night's sleep may provide the stimulus for extra productive effort the following day.

<sup>6</sup> Figure 6 was prepared from a table in reference 9.

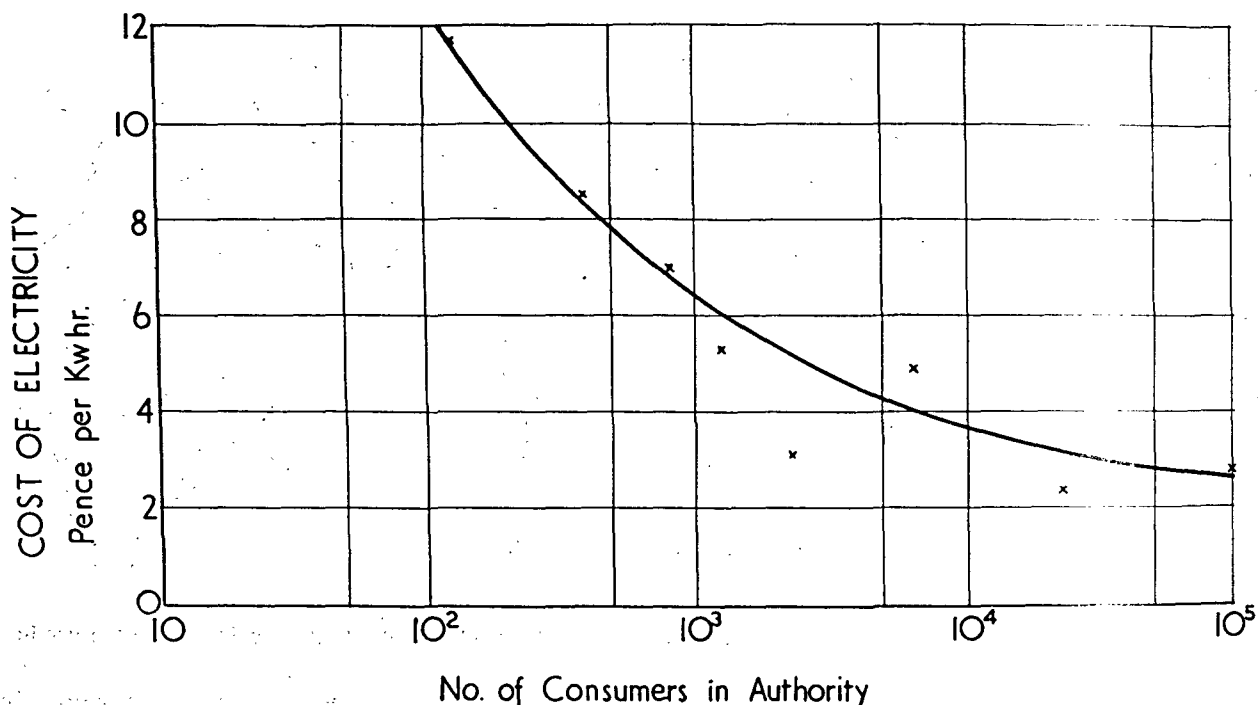


Figure 6. Cost of electricity in Queensland depending on number of consumers

(c) The peak airconditioning load on a house is generally small when compared on a basis of floor area with other buildings, but the period of occupancy tends to be longer. The capital cost of the equipment to meet the small peak load would be lower than for comparative industrial or commercial applications but the power cost would be large due to the long time of operation. Since capital investment is one of the drawbacks of solar installations, this would not be unduly exaggerated by peaky loads. The power cost is the expenditure that can be saved by solar energy and, where this is proportionately high, solar energy is at an advantage.

(d) To save additional land or structural costs, there is some advantage in having the solar absorber mounted on the building to be conditioned. This may restrict solar conditioning to one or two storey buildings as the roof area may be insufficient for the solar absorbers of buildings with a greater number of floors. Most domestic buildings would be of one or two storeys.

### Domestic airconditioning

It is completely useless to estimate airconditioning loads on existing tropical houses which are designed for natural ventilation and which have a light wall structure to allow quick cooling at night. In order to arrive at a satisfactory design, the requirements for a tropical airconditioned house were specified as follows:

- To be suitable for a location approximately 20°S latitude, either coastal or inland climates.
- To be fully airconditioned.

(c) To allow for economical operation of the air-conditioning equipment.

(d) To be suitable for the installation of flat-plate solar absorbers.

(e) To be suitable for an average family, provide amenities at present thought necessary for comfort-

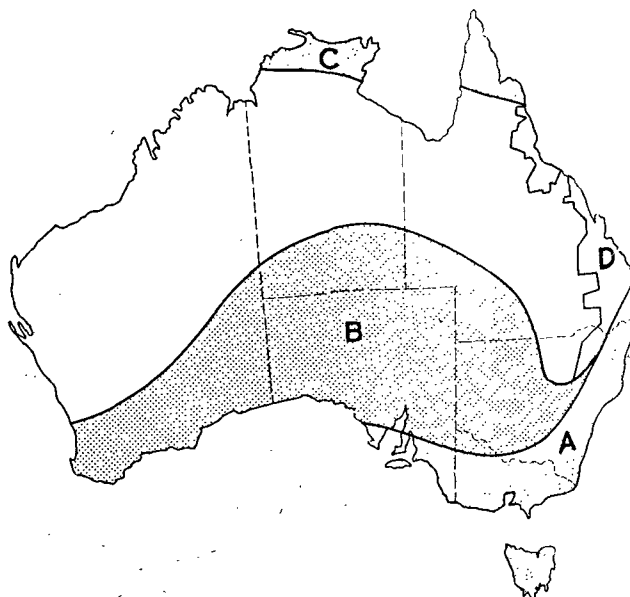


Figure 7. Area most suited to solar airconditioning (unshaded)

- Area with design dry-bulb temperatures less than 85°F;
- Area where evaporative air cooling may be suitable;
- Area where summer sunshine may be deficient;
- Area (not otherwise excluded) within reach of cheap electricity

sought when some lesser degree of conditioning may adequately satisfy the requirements. However, it is thought preferable to know the costs and benefits for the best system and later to lower the sights if forced by economical considerations.

There is no doubt of the need for development of the tropical north of Australia. If solar airconditioning can be developed, it should have good prospects for acceptance in this area which is singularly well suited to the utilisation of solar energy.

### References

1. Macpherson, R. K., *Environmental problems in tropical Australia*, Commonwealth Government Printer, Canberra, 1957.
2. Sheridan, N. R., Solar airconditioning, *Journal of Institution of Engineers, Australia*, 33, 47-52, 1961.
3. Albrecht, F. H. W., The Australian radiation network, *Climatology and Microclimatology*, U.N.E.S.C.O., 1958.
4. Anon. Australian radiation records, Bureau of Meteorology, Melbourne, 1953, 1954, 1955.
5. Sapsford, C. M., An estimation of solar energy radiation for Australia, *The Australian Journal of Science*, 20, 99-105, 1957.
6. Anon., Sunshine hours, Australia, Bureau of Meteorology, Melbourne, 1954.
7. Anon. Climatic data charts, Commonwealth Department of Works, Melbourne, 1958.
8. Anon. Atlas of Australian resources, Department of National Development, Canberra, 1953.
9. Anon. Twenty-third report, State Electricity Commission of Queensland, 1960.
10. Anon. Queensland year book, Commonwealth Bureau of Census and Statistics, Brisbane, 1959.
11. Löf, G. O. G., Cooling with solar energy, *Proc. Sum. App. Solar Energy*, 1955.
12. Heywood, H., Solar energy; past present and future applications, *Engineering*, 176, 411, 1953.

### Summary

Australia, with 40 per cent of its land area in the tropics but only 4 per cent of its population, has vast tropical areas awaiting development. Because of the rigours of climate, it has been suggested that airconditioning could do much to assist in populating this area.

Airconditioning has a reasonably large demand for power but the normal fuels, oil and coal, are not generally indigenous to the area. Imported fuels are expensive and it would seem that solar energy, with which the area is liberally supplied, should be investigated as a possible source of power. There are two reasons why airconditioning is one of the more attractive avenues for solar research:

(a) Since solar radiation is one of the largest airconditioning loads, the supply of energy matches the energy requirement;

(b) Solar energy, when absorbed by practical devices, is of low availability in the thermodynamic sense and should be suitable for the small temperature changes required in airconditioning.

To decide areas of Australia where solar airconditioning could be effective (unshaded area in figure 7), climatic and economic data are considered. Area A is excluded as its design dry-bulb temperature is below 85°F (figure 3) and thus may not warrant airconditioning. Area B, below the 70°F design wet-bulb isotherm (figure 5) may be more suitable for evaporative cooling. In area C, the radiation is reduced by cloud in summer (figure 2) and may not be sufficient to meet the load. Economic factors would make area D less suitable immediately as this area receives relatively cheap electric power (figure 6) by comparison with the uninhabited area (figure 4).

In this most suitable area, domestic airconditioning would be the most likely application because of the outdoor nature of work in the area. Other reasons for favouring domestic applications include less stringent indoor requirements, need for a good night's rest in the tropics, large power demand in relation to plant capacity due to 24-hour operation, and ability to accommodate a solar absorber on the existing structure.

As conventional houses are designed for natural ventilation, the requirements of an airconditioned tropical house are specified and a design produced for study and calculation. The specifications stipulate that the house should be suitable for a location at 20° South latitude, economical in construction and operation, adaptable to modern living habits, able to accommodate solar absorbers on the roof and simple in floor plan to facilitate model studies.

The resulting design (figures 8 and 9) is mechanically ventilated, provided with plant and instrument accommodation and has a single pitched roof optimised for summer absorption of solar energy. Features aimed at economy of air conditioning operation include the two-storey construction on a slab floor, insulated walls, sun shades, reflective exterior cladding, use of bulky wall materials to provide thermal storage and separation of day and night living areas.

With design outdoor conditions of 98°F dry-bulb temperature and 75°F wet-bulb temperature and corresponding indoor conditions of 82°F and 73°F, the peak load is about 24 000 btu/hr of refrigeration and the total daily load is 250 000 btu.

Various means of obtaining refrigeration by solar energy are listed but only absorption refrigeration and dehumidification systems are considered suitable.

For the particular project, absorption refrigeration has been chosen as most likely. It is expected that, with 160°-180°F obtained from a flat-plate solar absorber, a lithium bromide-water refrigerator of two tons capacity would produce the required total capacity from about 800 sq ft of absorbers.

An analysis of expected costs is given in tables 1 and 2. Table 1 shows a comparison of costs for airconditioning, with vapour compression refrigeration, a conventional 1 400 sq ft house and the design shown in figure 8. In addition, the house of figure 8 is costed for solar airconditioning. It will be noticed that, for the same investment, the operation cost of the insulated special design is only 64 per cent of the conventional construction. The cost of operating the solar house is only 45 per cent of the cost of the same house with vapour compression airconditioning but the cost of absorbers must be taken into account.

Table 2 analyses the cost structure of the solar absorbers and shows a downward trend from 50/- per sq foot to 42/- per sq ft with 30/- seemingly possible with quantity production. However, the price would have to fall to 20/- per sq ft before the above proposition would be attractive at the estimated power cost of 3d per kW hr. With higher power charges, the system may even be economic at present costs.

It is hoped to construct the above house and, in the meantime, to study it further with models. Even if complete house conditioning is uneconomic, some part conditioned system may evolve from the study. There is certainly a need for some economical means of controlling the climate in Australia's underpopulated tropics so that more people can be attracted to live their lives in the area. Thus the prospects for solar energy can be considered quite bright.

## PERSPECTIVES EN CE QUI CONCERNE LE CONDITIONNEMENT D'AIR UTILISANT L'ÉNERGIE SOLAIRE EN AUSTRALIE

### Résumé

L'Australie, dont 40 p. 100 de la surface se trouve dans la zone tropicale, qui n'est occupée que par 4 p. 100 de sa population, possède ainsi de vastes régions qui n'attendent que leur mise en œuvre. Eu égard aux rigueurs d'un tel climat, on a mis en avant l'idée que le conditionnement de l'air ferait beaucoup pour en faciliter le peuplement.

Le conditionnement de l'air ou climatisation demande la mise en œuvre d'une énergie assez appréciable, mais les combustibles classiques, tels que le pétrole et le charbon, ne sont pas généralement indigènes à ces régions. Les combustibles importés sont chers, et il semblerait que l'énergie solaire, disponible en abondance, devrait faire l'objet de recherches en tant que source possible d'énergie. Il y a deux raisons pour lesquelles le conditionnement de l'air constitue l'une des orientations les plus attrayantes pour les chercheurs qui s'intéressent aux applications de l'énergie solaire :

a) Pour autant que cette énergie elle-même constitue l'une des principales charges imposées aux installations de conditionnement, l'apport d'énergie correspond aux besoins de force motrice;

b) L'énergie solaire, quand elle est absorbée par des dispositifs pratiques, est disponible en quantités restreintes, au sens thermodynamique, et serait donc indiquée pour les faibles changements de température qu'exige la climatisation.

Pour déterminer quelles seraient les régions de l'Australie où le conditionnement de l'air pourrait avoir un bon rendement (régions non hachurées de la figure 7), on passera en revue les conditions climatologiques et économiques. La zone A est exclue, car sa température au thermomètre à boule

sèche, telle qu'on peut la prévoir pour les projets, est inférieure à 85 °F ou 29,4 °C (voir figure 3), et ceci ne peut pas justifier la climatisation. La région B, au-dessous de l'isotherme de 70 °F (21 °C) au thermomètre à boule humide, pour les besoins des calculs (voir figure 5), peut se prêter davantage au refroidissement par évaporation. Dans la région C, le rayonnement est réduit en été par les nuages (voir figure 2) et ne serait peut-être pas suffisant pour la charge. Des raisons économiques rendraient la région D moins bien adaptée à une application immédiate du système, car elle reçoit de l'énergie électrique relativement peu coûteuse (voir figure 6), par rapport à son prix dans la région inhabitée (voir figure 4).

Dans cette région, la plus adaptée pour le projet envisagé, le conditionnement d'air des habitations représenterait l'application la plus probable pour la climatisation solaire, étant donné que le travail, dans cette région, se fait généralement au dehors. D'autres raisons qui militent en faveur des applications ménagères comportent des exigences moins extrêmes pour l'intérieur, le besoin d'une température confortable pour le repos nocturne dans les climats tropicaux et les exigences considérables d'énergie, par rapport à la capacité de l'installation, eu égard au fait qu'elles se présentent 24 heures par jour. Citons enfin la possibilité d'installer un absorbeur solaire sur un édifice déjà construit.

Étant donné que les maisons classiques sont construites en tenant compte de leur ventilation naturelle, on a établi les cahiers des charges pour une maison « tropicale » avec climatisation et mis au point un projet, aux fins d'études et de calculs.

Les spécifications stipulent que la maison doit se prêter à être construite par 20° de latitude sud, et doit être économique à bâtir et à exploiter, adaptée aux coutumes modernes de la vie, capable d'être dotée d'absorbeurs solaires sur son toit, et simple quant à la disposition des pièces à chaque étage, pour faciliter les études sur maquette.

Le projet qui en résulte (figures 8 et 9) est ventilé mécaniquement, doté de l'installation et des instruments nécessaires, et on y prévoit un toit incliné unique qui se prête idéalement à l'absorption de l'énergie solaire pendant l'été. Les caractéristiques de climatisation comportent la construction en deux étages sur des planchers faits de ciment armé, des murs isolés, des stores, un revêtement extérieur capable de réfléchir le rayonnement, l'emploi de substances volumineuses dans les murs de manière à assurer l'accumulation des calories, et une séparation des pièces où l'on se tient pendant la journée et pendant la nuit, respectivement.

Avec des températures extérieures de 98 °F ou 36 °C au thermomètre à boule sèche et 75 °F ou 24 °C au thermomètre à boule humide, ainsi que des températures intérieures de 82° et 73 °F (28 °C et 23 °C), la charge maxima est de l'ordre de 24 000 Btu par heure de réfrigération et la charge totale quotidienne de 250 000 Btu.

On a présenté diverses méthodes pour assurer la réfrigération au moyen de l'énergie solaire, mais on n'a retenu comme indiqués que les systèmes à réfrigération par absorption avec assèchement. Pour le projet qui nous intéresse, la réfrigération par absorption a été choisie comme étant la plus indiquée. On s'attend à ce que, en se servant de températures de 160° à 180 °F (71° à 82 °C) obtenues au moyen d'un absorbeur solaire à plaque plate, un réfrigérateur utilisant du bromure de lithium

et de l'eau, ayant une capacité de deux tonnes, donnerait le débit global nécessaire en employant 800 pieds carrés d'absorbeur environ.

Les tableaux 1 et 2 donnent une analyse des frais prévus. Le tableau 1 donne une comparaison des frais de climatisation avec réfrigération par compression de vapeur, pour une maison classique de 1 400 pieds carrés, et suivant le plan qu'indique la figure 8. En outre, la maison de la figure 8 a fait l'objet de calculs relatifs à la climatisation solaire. On observera que, pour un même placement initial, le coût d'exploitation de la maison spéciale n'est que 64 p. 100 de celui de la maison classique. Le coût d'exploitation de la maison solaire n'est que 45 p. 100 du coût de la même avec climatisation par compression de vapeur, mais il faut tenir compte du prix d'achat des absorbeurs.

Le tableau 2 analyse les frais afférents aux absorbeurs solaires et révèle une tendance à la baisse de ces frais, de 50 shillings à 42 shillings par pied carré, avec la possibilité d'être ramenés à 30 avec la production en série. Ces frais auront à tomber à 20 shillings par pied carré avant que la suggestion mentionnée ci-dessus soit attrayante pour un coût d'énergie évalué à 3 pence par kWh. Avec des charges énergétiques plus élevées, le système serait même économique aux prix actuels. On compte construire la maison mentionnée ci-dessus et, entre temps, l'étudier plus en détail sur des maquettes. Même si la climatisation de l'ensemble d'une maison est anti-économique, il se peut que la valeur d'un système partiellement conditionné soit mise en lumière par ces travaux. On a certainement besoin de moyens économiques de modifier à volonté l'ambiance intérieure dans les régions tropicales sous-peuplées de l'Australie, de telle sorte que plus d'habitants puissent être attirés pour y faire leur vie. Dans ce contexte, les perspectives d'avenir de l'énergie solaire peuvent être jugées comme étant assez encourageantes.

## UTILISATION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE POUR LA RÉALISATION SIMULTANÉE DE LA DISTILLATION DE L'EAU SAUMÂTRE ET LA CLIMATISATION DES SERRES EN ZONES ARIDES

F. Trombe et M. Foëx \*

Les régions arides disposent parfois de quantités appréciables d'eau saumâtre (eau de mer, d'étang ou de nappes souterraines). Par contre, elles sont en général très pauvres en eau douce. Il en résulte souvent dans ces régions que les cultures, encore plus exigeantes pour la qualité de l'eau que les êtres vivants, sont très difficiles. Par ailleurs, beaucoup de zones dites arides bénéficient d'un ensoleillement exceptionnel et de ciel très clair entraînant une grande sécheresse de l'atmosphère. Ce dernier facteur restreint ainsi beaucoup les possibilités de cultures, l'eau apportée étant rapidement perdue par évaporation.

La question change d'aspect si on cultive les plantes non plus à l'air libre, mais dans des milieux relativement clos, permettant l'accès de la lumière et limitant beaucoup l'évaporation de l'eau. L'intérêt de telles cultures en espace clos a été souligné par différents auteurs, et en particulier par P. Chouard (1).

Nous avons mis au point, au Laboratoire de l'énergie solaire de Mont-Louis, un dispositif simple de culture qui s'inspire du même souci d'économie d'eau, en y ajoutant la possibilité de produire une eau pure *in situ*, à partir d'eau saumâtre (2, 3, 4).

La serre représentée sur les figures 1 et 2 comporte essentiellement les caractéristiques suivantes :

- a) Une base imperméable recouverte d'un milieu propre à la culture.
- b) Des bassins surélevés, par rapport au niveau de culture précédent, et contenant l'eau saumâtre à distiller. Ces bassins ne recouvrent qu'une partie de la serre.
- c) Une toiture formée d'éléments inclinés, en verre à vitre ou en plastique, transparents au rayonnement solaire.

d) Des parois pouvant présenter un isolement thermique convenable et être réfléchissantes.

L'eau saumâtre contenue dans les bassins est évaporée sous l'action du rayonnement solaire, puis se condense sur la paroi transparente inclinée qui est au-dessus et s'écoule au niveau du sol. La distance entre ce dernier et les bassins est de l'ordre de deux mètres; elle doit être suffisante pour permettre le développement des plantes et éventuellement l'accès du personnel.

La culture est favorisée par le fait que pendant le jour la température au niveau du sol peut être

inférieure à la température extérieure, et en tout cas à celle que l'on obtiendrait dans une serre du type classique non pourvue d'écrans et de parois isolantes.

En effet, le soleil n'est que partiellement admis dans la partie inférieure, en dessous des bassins, et l'air chaud existant sous la toiture vitrée ne descend pas, en raison de sa faible densité, au niveau des cultures. Par ailleurs, l'évaporation de l'eau des bassins limite également cette température produite sous la toiture. La disposition des bassins, des ouvertures et des parois réfléchissantes doit permettre, en cours de journée, un balayage des cultures par les zones d'ombre et de lumière.

Le gradient de température, de bas en haut, est accompagné d'un gradient d'état hygrométrique, car l'air saturé de vapeur d'eau, moins dense que l'air sec et par ailleurs surchauffé, a tendance à rester sous le vitrage.

La masse d'eau contenue dans les bassins peut être relativement importante, et sert de volant thermique et d'écran pour protéger les plantes d'un refroidissement nocturne excessif.

La nature de la paroi transparente qui recouvre la serre présente une certaine importance. Le verre est plus coûteux que certaines feuilles de matière plastique.

La transparence au rayonnement solaire des deux matières est à peu près la même (10 p. 100). Cependant, on note une plus grande transparence des plastiques pour l'ultraviolet, ce qui présenterait une certaine importance pour la floraison des plantes. Dans les différents domaines de l'infrarouge, les plastiques présentent, lorsqu'ils sont très minces, de nombreuses bandes d'absorption séparées par des zones plus transparentes. Le verre est transparent jusque vers 2,7 microns, puis totalement opaque à partir de 4,5 microns. Il présente en outre une bande de réflexion bien marquée vers 9,5 microns.

Dans le cas des couvertures en plastique très mince, une partie du rayonnement direct de la serre (bassins, culture) passera à travers le plastique; il sera bloqué entièrement dans le cas du verre.

### Description des montages et essais réalisés

Une première série d'essais a été effectuée en 1956-1957, avec un petit dispositif expérimental, comportant un sol de  $1,90 \text{ m} \times 0,90 \text{ m} = 1,7 \text{ m}^2$ , une

\* Laboratoire de l'énergie solaire du Centre national de la recherche scientifique, Mont-Louis, Pyrénées-Orientales, France.

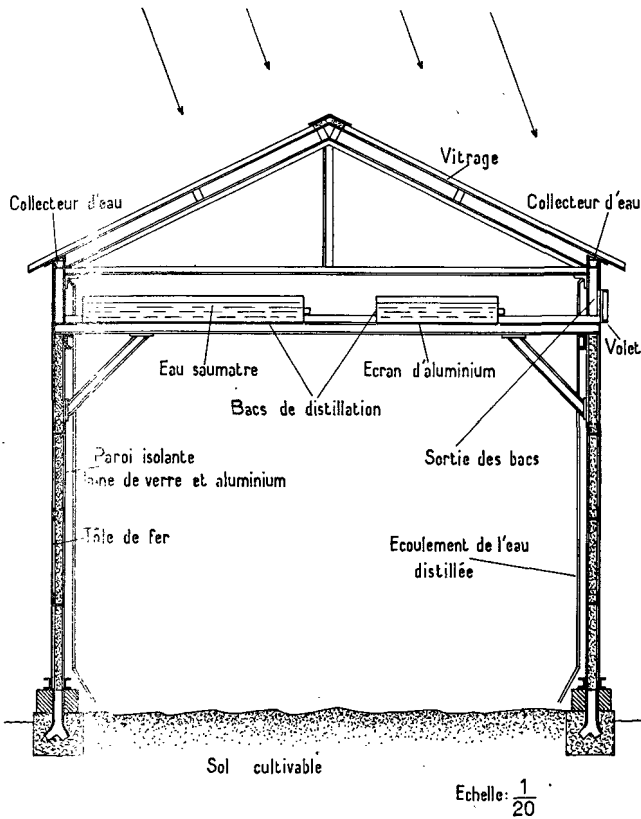


Figure 1. Coupe d'une serre permettant de réaliser simultanément la distillation de l'eau saumâtre et la climatisation en zones arides

surface des bassins de  $1,1 \text{ m}^2$ , une hauteur sous bassin de  $0,70 \text{ m}$ . On dispose ainsi de 5 à 6 litres d'eau distillée par jour. L'état hygrométrique de l'air au niveau de la culture est de l'ordre de 75 p. 100. On a ainsi procédé à Mont-Louis, au cours de deux mois d'été, à la culture de haricots verts hybrides, qui a donné une bonne floraison et une récolte convenable.

Un appareil plus important a été construit par notre laboratoire et mis en service au début du printemps 1961, au laboratoire Arago de Banyuls (Pyrénées-Orientales); ce laboratoire dépendant de l'Université de Paris, est dirigé par le Professeur Petit.

Nous allons passer en revue les différents facteurs conditionnant la vie des plantes dans les serres décrites, en examinant comment il est possible de contrôler chacun d'eux. Ces divers facteurs sont l'éclairement, la température, les besoins en eau, l'atmosphère, la nature du sol, la lutte contre les parasites.

### Rôle de l'éclairement

Le rayonnement solaire agit directement sur les plantes en réglant les phénomènes d'assimilation chlorophyllienne et de transpiration; il a aussi une influence sur la température de l'air et du sol et le degré hygrométrique de l'air.

En ce qui concerne l'action de la lumière, il convient de distinguer entre l'intensité reçue, souvent surabondante, et la répartition des heures d'éclairement suivant les saisons et les latitudes. De nombreuses plantes des régions tropicales et équatoriales n'ont besoin que d'une courte durée de jour pour fleurir ou fructifier. Certaines autres ne peuvent se développer convenablement que dans les régions où existent de longs jours pendant la saison d'été. Certaines plantes cultivées ont besoin pendant toute la durée de leur vie, ou simplement leur jeune âge, d'être, dans une certaine mesure, abritées du soleil.

On peut régler l'éclairement des plantes en augmentant ou en diminuant la surface des bassins de distillation d'eau, ou encore au moyen de panneaux réflecteurs du rayonnement solaire (panneaux en feuille d'aluminium ou panneaux peints en blanc) venant se placer dans les ouvertures laissées libres par les bassins.

Par ailleurs, dans bien des cas, il est souhaitable d'augmenter la lumière diffuse en utilisant des parois intérieures, réfléchissant aussi le rayonnement solaire.

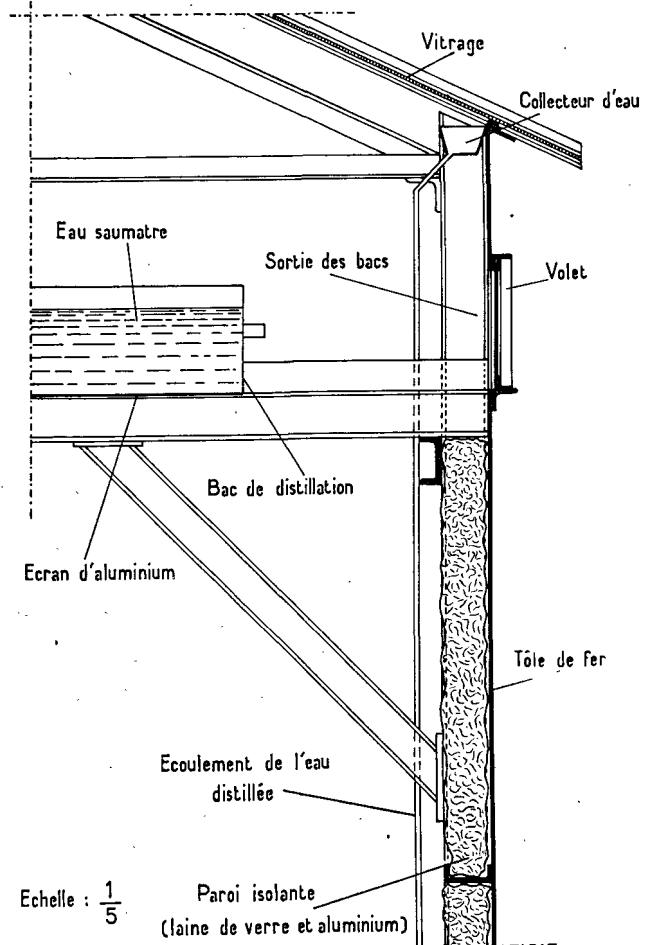


Figure 2. Détail d'une partie de la serre montrant la disposition des collecteurs d'eau et la constitution des parois latérales

### Influence de la température

Ce facteur est dans une certaine mesure lié à celui de l'éclairément, le chauffage des compartiments de culture étant dû pour une grande part au rayonnement solaire arrivant à ce niveau. Il conviendra d'éviter un échauffement excessif des plantes, les températures optima étant souvent de 20-25 °C, et les phénomènes végétatifs s'arrêtant vers 40 °C. Pour cela la proportion de couverture des zones cultivées devra être suffisamment importante.

Il est presque toujours avantageux d'isoler thermiquement les bassins de distillation des zones de cultures en plaçant entre les deux des écrans d'aluminium limitant les transmissions de chaleur par rayonnement. Les écrans d'aluminium permettent aussi de limiter l'action du rayonnement solaire et celle du rayonnement des vitrages chauffés par l'eau distillée.

Par une journée d'ensoleillement moyen des zones tropicales, on reçoit du soleil environ 7 kW par m<sup>2</sup> (surface horizontale), dont environ 6 kW sont susceptibles de pénétrer à travers les vitrages. La quantité d'eau distillée atteint 4 à 5 litres par m<sup>2</sup> de bassin, ce qui correspond à peu près à 3 kW d'énergie absorbée. On note qu'une partie notable de l'énergie est perdue par rayonnement de l'eau portée à 60° ou 70°, par exemple.

Au cours de la nuit, la serre cesse de s'échauffer, cependant que la distillation de l'eau dans les bassins s'arrête. Il se produit alors un refroidissement des vitrages soumis à l'action de l'air froid de la nuit et perdant de l'énergie par rayonnement sur l'espace. Si l'on admet que le verre à la température ambiante présente dans ces conditions un facteur d'émission de 0,9, une surface horizontale de verre dans les régions arides à ciel clair perdra par rayonnement de 100 à 150 Watts/m<sup>2</sup> (soit environ 3 kWh/m<sup>2</sup> par 24 h et 1,5 kWh/m<sup>2</sup> par nuit). L'air froid formé au contact du vitrage ne restera pas dans la zone supérieure de la serre, mais descendra dans la zone de culture par les ouvertures, destinées à l'éclairément des plantes pendant le jour, dès que la température de la partie supérieure aura baissé suffisamment. Si bien que l'ensemble du bâtiment sera intéressé par le rayonnement nocturne des vitrages. L'énergie rayonnée permet aisément de limiter la température moyenne de la zone de culture. Les variations de température de la partie inférieure de la serre peuvent être limitées en augmentant sa masse calorifique, au moyen de masses de béton ou de réservoirs d'eau.

Le contrôle de la température dépend aussi des dimensions des bâtiments. Le développement relatif des parois extérieures est évidemment fort important. Il est toutefois facile de les équiper de revêtements sélectifs permettant d'éviter leur échauffement pendant la journée et d'obtenir un refroidissement nocturne important. La nature du sol et de la végétation voisine joue également un grand rôle.

La température moyenne des serres ne devra pas trop dépasser la température moyenne extérieure,

mais les écarts de température y seront moins importants. On note en effet dans les régions « type saharien » des écarts de température jour-nuit pouvant dépasser 15 °C<sup>1</sup>.

### Besoins en eau

La quantité d'eau saumâtre distillée est de l'ordre de 4,5 litres par mètre carré de surface de bassin. La quantité d'eau par mètre carré de sol cultivable dépend donc de la surface utilisable couverte par les bassins. En admettant 300 jours de fonctionnement par an, on recevra donc par mètre carré de sol : 1 050 litres par an pour 80 p. 100 de couverture, 900 litres par an pour 70 p. 100, 750 litres par an pour 60 p. 100. Ces quantités sont très importantes pour un travail en économie d'eau; elles pourraient suffire à plusieurs étages de culture, ou encore à satisfaire d'autres besoins humains ou animaux.

Notons qu'en dehors des régions arides proprement dites il existe beaucoup de régions ensoleillées où les quantités d'eau de pluie sont très insuffisantes et surtout beaucoup trop irrégulières. On note ainsi que seule une petite partie de l'eau de pluie (20 p. 100 par exemple) est mise à la disposition de la plante, les pertes par ruissellement atteignant au cours de certaines pluies violentes 60 à 70 p. 100. De plus, il conviendrait de tenir compte des pertes par évaporation.

On comprend dès lors tout l'intérêt que peuvent présenter les dispositifs permettant de travailler en économie d'eau, même si leur prix de revient peut atteindre un certain prix.

### Rôle de l'atmosphère

Le taux d'humidité de l'atmosphère est réglable en agissant sur l'ensoleillement de la zone de culture. Il semble cependant être indispensable de procéder à une certaine aération de la partie inférieure de la serre par des canaux prévus à cet effet, sans qu'il soit nécessaire de perdre une quantité importante d'eau. L'air très sec des régions désertiques permettra facilement de diminuer l'humidité et de procéder aux apports d'oxygène nécessaire. On peut aussi prévoir des dispositifs permettant de récupérer l'humidité évacuée lors des aérations (dessicateurs). Une autre façon de limiter les échanges entre le compartiment de distillation et celui des cultures consiste à interposer entre les deux une feuille de plastique.

On accroît sensiblement le rendement des cultures en augmentant artificiellement la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère (1 ou 10 p. 100 par exemple, au lieu de 0,1 p. 100 en moyenne).

<sup>1</sup> A Colomb-Béchar, on observe en moyenne 0 °C comme température annuelle la plus basse, 45 à 50 °C comme températures les plus hautes.



## Nature du sol

La nature du sol sur lequel la serre est bâtie n'a qu'une importance réduite, étant donné que les planches de culture pourront le plus souvent être établies avec un terreau artificiel, mélange de terre, de fumier et d'engrais. De plus, il sera également possible de procéder à des cultures sans sol dans des bacs de ciment, contenant des solutions nutritives convenablement disposées.

D'une façon générale, la culture en serre permet de limiter les pertes d'engrais divers ou de terres arables par érosion lors des périodes de grand vent ou lors des orages, très rares mais violents, qui se produisent souvent dans les régions arides ou semi-arides. De plus, l'action de l'eau de pluie se manifeste souvent aussi par des effets d'ordre chimique, avec entraînement de l'humus et de sels minéraux.

En zone aride, il conviendra le plus souvent de conditionner entièrement la nature du milieu de culture. Les cultures sans sol présentent à cet égard un avantage certain. On pourra aussi récupérer les produits végétaux inutilisables en vue de la fabrication par fermentation de fumier artificiel à l'intérieur de la serre. Si les pertes sont ainsi limitées au minimum, on devra apporter par ailleurs dans les meilleures conditions possibles tout ce qui est nécessaire à la production de matière végétale.

## Lutte contre les parasites

Tout d'abord, les serres qui sont sensiblement étanches forment un barrage important pour les insectes et certaines autres espèces animales, comme les oiseaux ou les rats. Cette protection peut être améliorée par la présence d'un dallage cimenté ou de plaques métalliques disposées en profondeur sous la zone de culture. De même, on limitera ainsi beaucoup les contaminations par les parasites végétaux.

Par ailleurs, nous avons constaté, lors de nos premiers essais, que de très nombreux insectes, et en particulier les insectes ailés, attirés par la lumière beaucoup plus vive qui règne dans la partie supérieure de la serre, pénètrent dans ce compartiment et se noient dans les bassins d'eau chaude, sans qu'il soit besoin de prendre des mesures spéciales pour cela.

Enfin, il sera plus aisé de limiter les pertes de produits chimiques ou biologiques susceptibles d'être utilisés pour lutter contre les parasites ou les maladies des plantes, ou pour améliorer certaines formes de culture.

## Comparaison des conditions de culture avec celles de la palmeraie ou de la forêt équatoriale

La voûte protectrice réalisée par les vitrages permet de réaliser dans la serre un micro-climat qui n'est pas sans rappeler celui que l'on observe sous les ombrages de certains arbres. Suivant la disposition des diffé-

rentes parties de la construction, et plus spécialement des bassins de distillation d'eau, on peut obtenir des conditions voisines de celles des sous-bois de la forêt équatoriale, de la palmeraie ou d'autres types de climats intermédiaires.

Notons en passant que la forêt a l'avantage d'être une source importante d'humus (100 à 200 tonnes par hectare et par an pour la forêt équatoriale, 5 à 50 tonnes pour la savane), mais présente la contrepartie d'immobiliser une quantité considérable de matière végétale (1 000 tonnes par hectare hors du sol, 300 tonnes de racines pour la forêt équatoriale).

Il ne faut pas se faire d'illusions sur l'importance des réserves dans les sols de forêt. Les terrains n'y sont en effet que très relativement riches, et il faut tenir compte de la puissance du système racinaire de certaines espèces. Mais de plus, on peut considérer que la forêt est sensiblement en équilibre avec le milieu dans lequel elle se constitue: les débris végétaux restituent au sol à peu près tout ce que les arbres et les plantes y avaient pris. On ne pourrait sans danger y faire des prélèvements trop importants.

Il convient, pour obtenir des rendements élevés, de réaliser un équilibre judicieux entre les différents facteurs précédents, et plus spécialement entre la lumière, la température et l'humidité, ces conditions pouvant différer d'une façon considérable suivant les espèces cultivées et évoluant en général sensiblement au cours de la croissance d'une plante déterminée.

La construction des serres étant relativement onéreuse, les cultures doivent y avoir nécessairement un caractère intensif et être organisées, du point de vue humain, d'une façon rationnelle.

De telles installations n'ont de réel intérêt que dans les régions arides où l'on dispose de journées ensoleillées et d'un ciel nocturne clair, facteur indispensable pour limiter la température moyenne de la serre. Les zones équatoriales et tropicales humides n'ont pas besoin de tels dispositifs, qui ne pourraient du reste y fonctionner convenablement.

Si l'on considère que 20 p. 100 du rayonnement solaire est suffisant pour éclairer les plantes, 80 p. 100 seront utilisables pour la distillation de l'eau. A surface de parois transparentes égales, on produira donc avec les serres quatre-cinquièmes de l'eau distillée donnée par un distillateur simple.

Le facteur le plus délicat à déterminer est la quantité d'eau nécessaire aux cultures par m<sup>2</sup>, autrement dit la surface utile des cultures à protéger par rapport à la surface des bassins d'eau. Tout dépend évidemment, et pour beaucoup, des cultures envisagées; seuls les essais scientifiquement menés permettront de le déterminer. Admettons toutefois qu'une hauteur d'eau de 0,50 m par an soit suffisante en économie d'eau; on pourrait cultiver dans ces conditions une surface égale à deux fois la surface du sol de la serre, ou 1,5 fois si on admet certaines pertes provoquées par les aérations. Des planches de cultures disposées à mi-hauteur permettraient d'utiliser cette eau à l'intérieur de la serre même. Dans ces conditions,

la surface totale à couvrir serait de l'ordre de 1 pour la serre distillatrice de culture, de 0,8 pour le distillateur simple et de  $0,8 + 1,5 = 2,3$  pour les cultures en économie d'eau, soit 2 ou 2,5 fois plus de surface pour le dispositif double. Par contre, la serre distillatrice nécessite une surélévation des bassins. On devra donc tenir compte du prix des supports de ces bassins et de celui des parois périphériques. Ces dernières devront être réduites autant que possible en augmentant la surface des serres.

Le climat le plus facile à réaliser étant à la fois chaud et humide, il sera plus utile d'en tenir compte dans le choix des cultures à réaliser. De bons résultats devraient être ainsi obtenus avec la manioc, les patates douces ou les ignames, ou encore avec certains légumes verts comme les salades (scarole surtout), tomates, aubergines.

### Remarques sur les prix de revient

Le prix de revient de telles serres n'est pas très supérieur à celui des serres ordinaires, dont elles diffèrent essentiellement par le dispositif de distillation d'eau placé à leur partie supérieure. Une serre de  $6 \times 3 = 18 \text{ m}^2$  de surface utile est revenue à 7 400 NF : 3 400 NF de matériaux (profilés de fer : 1 310 NF; tôles : 600 NF; vitrages : 600 NF; calorifuge : 360 NF; béton : 170 NF) et 4 000 NF de main-d'œuvre, soit environ 400 NF le  $\text{m}^2$ . Il convient de souligner qu'il ne s'agit là que d'une serre de petites dimensions, pour laquelle l'importance des parois latérales est considérable. En très grand, le prix pourrait être abaissé de moitié.

Le prix de la main-d'œuvre pourrait être réduit dans de larges proportions par l'emploi de profilés spéciaux en cornière perforée. L'emploi d'un tel matériau relativement léger diminuerait ainsi dans une très large proportion le prix du transport. C'est ainsi que le profilé nécessaire pour la réalisation, d'une part, d'une plate-forme de 2 mètres de hauteur, susceptible de supporter  $60 \text{ kg/m}^2$  et, d'autre part, des supports de vitrages (ou de plastique) reviendrait à environ 50 NF le  $\text{m}^2$  pour une serre de très grandes

dimensions<sup>2</sup> (faible influence des parois latérales). En tenant compte du prix des vitrages, des bacs de distillation d'eau et de la main-d'œuvre, l'ensemble ne devrait pas dépasser 200 NF le  $\text{m}^2$ .

On pourrait à première vue penser à remplacer les serres telles qu'elles viennent d'être décrites par un ensemble d'appareils séparés comprenant des distillateurs d'eau et des dispositifs de culture en économie d'eau. Pour être valables, ces dispositifs en économie d'eau doivent comprendre des aménagements permettant de limiter la température, de contrôler l'humidité, de doser la quantité de lumière et de permettre un accès commode aux cultures.

On remarque que la construction d'une plate-forme qui différencie un type d'appareil des serres classiques, n'a qu'une incidence assez faible sur le prix de revient.

L'usage de simples couvertures en plastique très bon marché permet de travailler en économie d'eau, mais non de réaliser des conditions comparables à celles que l'on trouve dans les serres qui viennent d'être décrites. Il serait nécessaire pour s'en rapprocher quelque peu d'employer des écrans extérieurs limitant l'action du rayonnement solaire. Toute comparaison avec de tels appareils est donc fort difficile, d'autant plus qu'actuellement l'usage des feuilles de plastique en agriculture est essentiellement saisonnier, et que le matériel n'est souvent pas aisé à récupérer.

Actuellement, nous prévoyons la construction prochaine d'une serre de grande dimension dans les régions sahariennes. Ces régions sont très favorables à une telle expérience du point de vue des conditions climatiques : latitude assez basse, fort ensoleillement, ciel clair, grande sécheresse de l'atmosphère, écarts de température jour-nuit importants. Les conditions économiques sont également excellentes : défaut presque total de légumes frais ou même de produits alimentaires, plus spécialement au voisinage des nouveaux centres créés autour des mines et des concessions de pétrole.

<sup>2</sup> Réalisables en juxtaposant plusieurs des éléments précédemment décrits.

### Références

1. Chonard, P., Le Centre de recherches sahariennes de Beni-Aldés et les recherches biologiques et agronomiques au Sahara, *C. R. Acad. d'Ag.*, 43, 477, 1957.
2. Trombe, F. et Foëx, M., Dispositif pour la culture dans les régions arides et ensoleillées, Brevet français n° P.V. 731 561, 1957.
3. Trombe, F. et Foëx, M., Dispositif permettant la culture dans des régions arides et ensoleillées, *C. R. Acad. d'Ag.*, 30 octobre 1957.
4. Trombe, F. et Foëx, M., Étude des collecteurs plans sans concentration d'énergie, Colloque sur l'énergie solaire du C.N.R.S., Mont-Louis, France, 1958.
5. Adam, J., *Technique Agricole des Pays Chauds*, Laboratoire autonome, Paris.

### Résumé

Les zones arides ensoleillées disposent souvent de quantités appréciables d'eau saumâtre utilisable, après distillation, aussi bien pour la consommation humaine ou animale que pour les végétaux. D'autre part, la sécheresse de l'atmosphère limite beaucoup les possibilités de culture, l'eau étant rapidement évaporée et une faible fraction servant réellement à l'alimentation des plantes.

On a réalisé, au Laboratoire de l'énergie solaire de Mont Louis, un type de serre spéciale, permettant de distiller de l'eau saumâtre et susceptible de servir, en même temps, à la culture en économie d'eau.

Ces serres comportent : a) une toiture vitrée ou recouverte de plastique transparent servant de condenseur à l'eau distillée; b) immédiatement au-dessous, des bacs remplis d'eau saumâtre captant la plus grande partie de l'énergie; c, une capacité occupant la surface totale d'implantation de la serre et suffisamment développée en hauteur, 2 mètres environ, pour qu'un climat indépendant de celui qui existe sous le vitrage puisse être obtenu.

L'éclairage comme la température sont réglables en augmentant ou diminuant la surface relative des bassins d'eau. Des écrans d'aluminium placés sous les bassins de distillation permettent de limiter le rayonnement de ces derniers sur les plantes, et d'éviter l'échauffement excessif des cultures. La nuit, l'air froid formé dans la partie supérieure des vitrages s'écoule dans la partie basse de la serre, contribuant ainsi à diminuer sa température. D'une façon générale, la température moyenne ne devra pas dépasser la température moyenne extérieure, mais les écarts de température jour-nuit seront beaucoup moins importants que ceux observés dans les régions arides et ensoleillées (soit 15° environ).

On dispose sur la surface cultivable de cette serre, d'une quantité d'eau pouvant atteindre annuellement 1 000 litres au m<sup>2</sup>, ce qui est souvent surabondant lorsqu'on travaille en économie d'eau. Le taux d'humidité de l'atmosphère au voisinage des cultures

est conditionné par l'ensèvellement qui est reçu directement dans la serre, ainsi que par les apports d'eau extérieur.

Le dispositif examiné permet aussi d'empêcher l'érosion du sol par le vent, et le lessivage des sels minéraux par les eaux de pluies torrentielles. Par ailleurs, on réalise ainsi une protection extrêmement efficace contre les divers parasites, et plus spécialement contre les insectes.

Des essais favorables ont été effectués sur des éléments de petites dimensions. Une serre de 6 mètres de long (axe ouest-est), de 3 mètres de large et de 3 mètres de hauteur (2 mètres sous bassins) a été installée au Laboratoire marin de Banyuls (Faculté des Sciences de Paris), où les essais sont en cours. Un autre appareil du même type, mais beaucoup plus important, doit être construit en 1961 dans la région saharienne.

La voûte protectrice formée par la paroi transparente permet de réaliser dans la serre un microclimat qui présente certaines analogies avec celui que l'on observe sous les ombrages de certains arbres. Suivant la disposition des différentes parties de la construction, et plus spécialement des bassins de distillation d'eau, on peut obtenir des conditions voisines de celles de sous-bois de la forêt équatoriale, les conditions de la palmette, ou encore d'autres types de climats intermédiaires.

La culture doit y avoir nécessairement un caractère intensif.

Le prix de revient de telles serres n'est pas très supérieur à celui des serres ordinaires, dont elles diffèrent essentiellement par le dispositif de distillation d'eau placé à leur partie supérieure. On pourrait aussi songer à réaliser d'une part des distillateurs d'eau et d'autre part des serres travaillant en économie d'eau, mais les possibilités de culture dans ces dernières sont très différentes et très inférieures à celles du dispositif étudié ici, sans que le prix de revient de l'ensemble en soit abaissé.

## UTILIZATION OF SOLAR ENERGY FOR SIMULTANEOUS DISTILLATION OF BRACKISH WATER AND AIR-CONDITIONING OF HOT-HOUSES IN ARID REGIONS

(Translation of the foregoing paper)

F. Trombe and M. Foëx \*

Arid regions sometimes have substantial amounts of brackish water (sea water, pond water, or ground water). Fresh water, on the other hand, is usually very scarce. In consequence, it is sometimes very difficult to raise certain crops that require even higher water quality than living beings. Furthermore, many areas that are termed arid enjoy exceptional sunlight conditions and very clear skies, making the atmosphere extremely dry. The latter factor greatly restricts the opportunities for growing plants, since the water provided for them is rapidly lost by evaporation.

The question assumes a different aspect when the plants are cultivated, not in the open air, but in relatively closed environments, permitting the access of light and sharply restricting the evaporation of water. Various authors, especially Chouard (1), have stressed the interest that attaches to such cultivation in closed spaces.

At the Mont-Louis Laboratory of Solar Energy, we have developed a simple method of growing plants, motivated by the same concern for economizing water, with the added feature of the production, on the spot, of pure water from brackish water (2, 3, 4).

The hot-house shown in figures 1 and 2 consists essentially of the following characteristic components:

- (a) An impermeable base covered with a medium suitable for growing purposes;
- (b) Pans located above the level of this growing medium, and containing the brackish water to be distilled. These pans cover only part of the hot-house;
- (c) A roof formed of inclined elements, with glass or plastic glazing transparent to solar radiation;
- (d) Walls that can provide appropriate thermal insulation and reflect the radiation.

The brackish water in the pans is evaporated under the action of the solar radiation; it then condenses on the inclined transparent wall above and runs off to the soil level. The distance between this level and the pans is of the order of two metres. It must be sufficient to give the plants room to grow and permit access of personnel when necessary.

Cultivation is promoted by reason of the fact that during the day the temperature at soil level may be lower than the outside temperature and, in any case, lower than that of a conventional hot-house without screens and insulating walls.

As a matter of fact, the sun is admitted only partially into the lower part below the pans, and the hot air under the glazed roof does not descend to the level of the plants, owing to its low density. Moreover, the evaporation of the water in the pans also limits the temperature produced under the roof. The arrangement of the pans, the openings and the reflecting walls must be such as to permit the growing plants to be swept during the course of the day by zones of shade and light.

The temperature gradient in an upward direction is accompanied by a gradient of relative humidity, for the air saturated with water vapour, which is less dense than the dry and superheated air, tends to remain under the glazing.

The mass of water in the pans may be relatively large, serving them as a thermal flywheel and as a screen to protect the plants against excessive cooling at night.

The nature of the transparent wall covering the hot-house is rather important. Glass is more expensive than certain plastic films.

The transparency of both materials to solar radiation is about the same (90 per cent). However, plastic is more transparent in the ultraviolet, which is important for the flowering of plants. In various regions of the infrared, very thin films of plastic have numerous absorption bands separated by more transparent zones. Glass is transparent up to about 2.7 microns, and then completely opaque beyond 4.5 microns. It also displays a well-marked reflection band towards 9.5 microns.

In the case of very thin plastic covers, part of the direct radiation from the hot-house (pans and growing plants) will pass out through the plastic, while it is completely blocked in the case of glass.

### Description of the installations and tests made

A first series of experiments was run in 1956-1957 on a small experimental set-up, comprising a growing area of  $1.90 \times 0.90 \text{ m} = 1.7 \text{ m}^2$ , a pan area of  $1.1 \text{ m}^2$ ,

\* Laboratoire de l'énergie solaire du Centre national de la recherche scientifique, Mont-Louis, Pyrénées-Orientales, France.

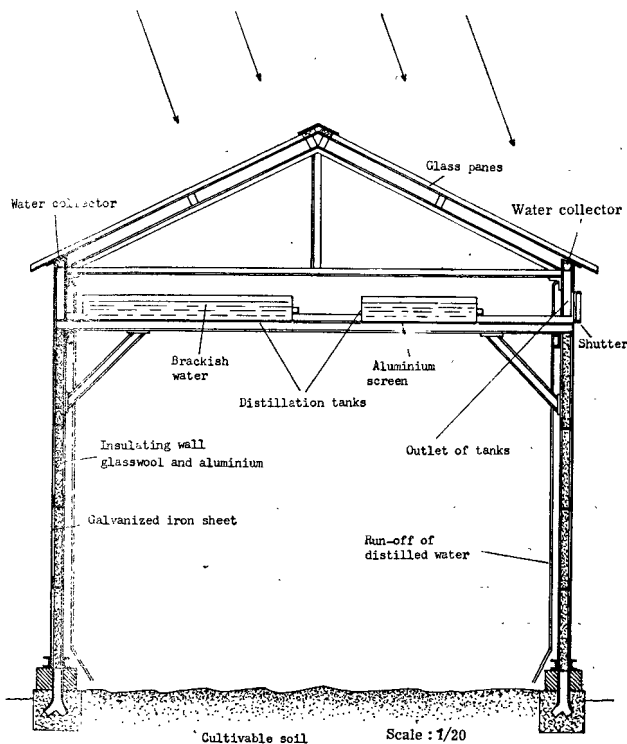


Figure 1. Cross-section of hot-house permitting simultaneous distillation of brackish water and air conditioning in arid regions

and a height of 0.70 m above the pan. This yielded 5 to 6 litres of distilled water a day. The relative humidity of the air at the growing level was the order of 75 per cent. In this way, hybrid French beans were grown at Mont-Louis during two summer months. Flowering was good and the yield satisfactory.

Our laboratory built a larger installation and put it into service at the beginning of spring 1961, at the Arago Laboratory, Banyuls, Pyrénées Orientales. That laboratory is under the University of Paris and is directed by Professor Petit.

We shall now review the various factors that affect plant life in these hot-houses, and shall examine how each of them may be controlled. These factors are: illumination, temperature, water requirements, the atmosphere, the nature of the soil, and pest control.

### The role of illumination

Solar radiation acts directly on plants by controlling the phenomena of chlorophyll assimilation and transpiration. It also affects the air and soil temperature and the relative humidity of the air.

In discussing the action of light, one should distinguish between the intensity received, which is often extremely great, and the distribution of the hours of sunshine according to the season and the latitude. Numerous plants of the tropical and equatorial regions need only a short duration of sunshine

to flower or bear fruit. Certain others can develop properly only in regions with long summer days. Certain cultivated plants need to be somewhat sheltered from the sun during their entire lifetime, or only when young.

The illumination of the plants can be controlled by increasing or decreasing the surface area of the water distillation pans, or by means of panels that reflect the solar radiation (aluminium foil panels or panels painted white) placed in the openings left free by the pans.

In many cases, it is desirable to increase the diffuse light by means of interior walls which also reflect the solar radiation.

### Influence of the temperature

To a certain extent, this factor is connected with that of illumination, since the heating of the growing compartments is largely due to the solar radiation reaching that level. Excessive heating of the plants should be avoided. The optimum

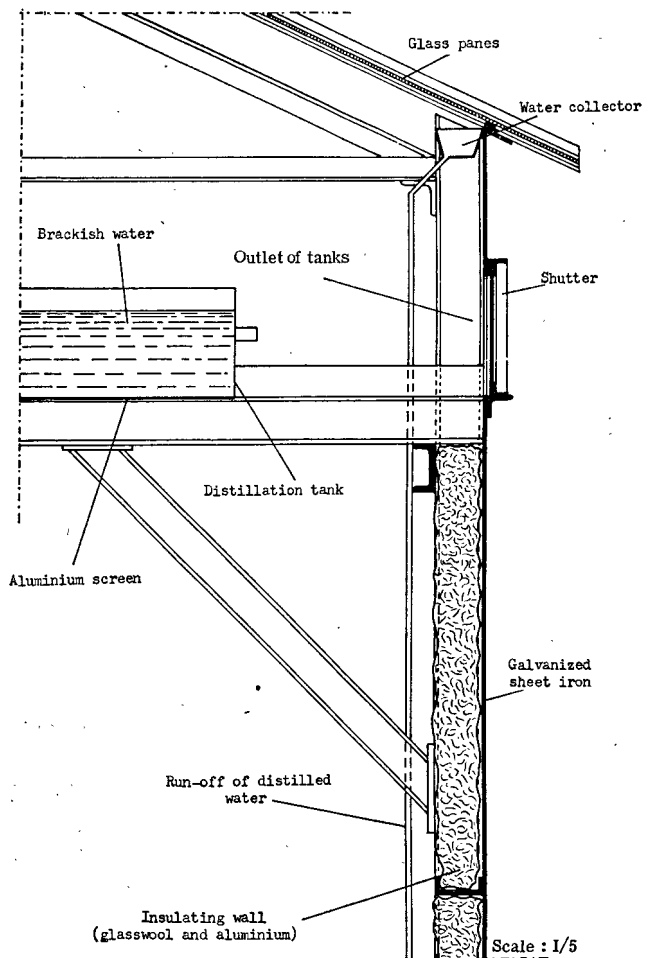


Figure 2. Detail of part of the hot-house, showing the arrangement of the water collectors and the structure of the lateral walls

temperatures are often 20-25°C; vegetative phenomena cease when 40°C is approached. The cover ratio of the growing zones must be adequate for this purpose.

It is almost always advantageous to insulate the distillation pans from the growing zones by interposing aluminium screens between them to limit radiative heat transfer. These screens thus allow us to limit the action of the solar radiation and of the radiation from the panes heated by the distilled water.

In a day of average sunshine duration in the tropical zones, about 7 kW/m<sup>2</sup> of horizontal surface is received from the sun. About 6 kW of this can penetrate through the panes. The amount of water distilled is 4 to 5 l/m<sup>2</sup> of pan surface, which corresponds to about 3 kW of energy absorbed. It will be noted that a considerable portion of the energy is lost by radiation from the water heated, say, to 60 or 70°C.

In the course of the night, the heating of the hot-house stops, and the distillation of the water in the pans is interrupted. The panes are then cooled by the cold night air and lose energy by radiation into space. Assuming the emission factor to be 0.9 under these conditions for glass at the ambient temperature, a horizontal glass surface in an arid region, under a clear sky, would lose from 100 to 150 watts/m<sup>2</sup> by radiation (or about 3 kWh/m<sup>2</sup> in twenty-four hours and 1.5 kWh/m<sup>2</sup> at night). The cold air formed on contact with the glass would not remain in the upper part of the hot-house, but would descend into the growing zone through the openings used to illuminate the plants during the day, as soon as the temperature of the upper part had fallen sufficiently. In this way, the whole building would be affected by the nocturnal radiation of the panes. The radiated energy makes it easily possible to limit the average temperature of the growing zone. The temperature variations of the lower part of the hot-house may be limited by increasing its calorific mass by means of masses of concrete or tanks of water.

Temperature control also depends on the dimensions of the building; the relative area of the outside walls is obviously very important. However, it is easy to cover them with selective linings to prevent them from becoming heated during the day and to obtain substantial cooling at night. The nature of the soil and of the adjacent vegetation also plays an important role.

The average temperature of the hot-houses should not too greatly exceed the average outside temperature, but the daily range of temperature is less important. In regions of the "Sahara type", indeed, the day-night temperature difference may exceed 15°C.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> The mean annual minimum temperature observed at Colomb-Béchar is 0°C, while the mean annual maximum ranges from 45 to 50°C.

## Water requirements

The quantity of brackish water distilled is of the order of 4.5 litres per square metre of pan surface. The quantity of water per square meter of cultivable soil thus depends on the utilizable surface covered by the pans. Assuming 300 days of operation per annum, we thus obtain, per square metre of soil: 1 050 litres per annum for 80 per cent coverage, 900 litres per annum for 70 per cent, and 750 litres per annum for 60 per cent. These amounts are very large for operations under water-saving conditions, and could grow several crops a year or meet other needs of human beings or animals.

We note that besides what are termed arid regions, strictly speaking, there are also many sun-drenched regions where the rainfall is very inadequate and, above all, far too irregular. We also note that only a small part of the rain-water (say 20 per cent) is available to the plants, for the percolation losses may reach 60 to 70 per cent during some violent rainstorms. The evaporation losses must also be taken into account.

We are now in a position to understand all the interest that might attach to devices permitting operation under water-saving conditions, even if their first cost were rather high.

## The role of the atmosphere

The relative atmospheric humidity may be regulated by varying the sunshine duration in the growing zone. It seems nevertheless to be necessary to provide a certain amount of aeration for the lower part of the hot-house by means of air ducts provided for this purpose. Otherwise, the loss of a large amount of water would be unavoidable. The very dry air of desert regions would make it easy to reduce the humidity and bring in the required oxygen. Devices might also be provided for recovering the humidity discharged during aeration (a desiccator, etc.). Another way of limiting the exchange between the distillation compartment and the growing compartment would be to interpose a plastic sheet between them.

The yield of the crops will be appreciably increased by artificially increasing the carbon dioxide content of the atmosphere (to 1 or 10 per cent, for instance, instead of its average value of 0.1 per cent).

## Nature of the soil

The nature of the soil on which the hot-house is built is only of minor importance, since the growing beds can in most cases be built with an artificial soil, a mixture of earth, manure and fertilizer. Moreover, hydroponic cultivation could also be practised in suitably arranged cement tanks with nutritive solutions.

In general, hot-house growing limits the losses of fertilizer or arable land by erosion during periods

of high wind or during storms, which are very rare but violent, and occur in many arid and semi-arid regions. Furthermore, rain-water sometimes also produces chemical effects by entrainment of humus and leaching of mineral salts.

In an arid zone, it is most often appropriate to completely condition the nature of the culture medium. Soil-less cultures present a certain advantage in this respect. Waste vegetable products may also be collected for making compost inside the hot-house. If the losses are minimized in this way, all things necessary for the production of vegetable matter should be otherwise brought in, under the best possible conditions.

### Pest control

First of all, hot-houses that are substantially tight constitute a major barrier to insects and certain other animal pests, such as birds and rats. This protection may be still further improved by cemented paving stones or metal plates arranged in depth beneath the growing zone. Infestation by vegetable parasites will thereby also be much diminished.

We also noted during our first experiments that very large numbers of insects, especially winged insects, were attracted by the much brighter light in the upper part of the hot-house, entered that compartment, and drowned in the pans of hot water, without making it necessary to take special measures to stop it.

Finally, it will be easier to limit the losses of chemical or biological products that can be used to control pests or plant diseases, or to ameliorate certain crops.

### Comparison of the cultural conditions with those in the palm grove or equatorial forest

The protective vault formed by the panes yields a micro-climate in the hot-house somewhat recalling that observed in the shade of certain trees. According to the arrangement of the various parts of the design, especially the water distillation pans, conditions similar to those in equatorial forest under growth may be obtained, or those of the palm grove or other types of intermediate climates.

We note, by the way, that the forest has the advantage of being a major source of humus (100-200 metric tons per hectare per annum in the equatorial forest, 5 to 50 tons in the savannah), but also presents the corresponding disadvantage of immobilizing a substantial amount of vegetable matter (1 000 metric tons per hectare outside the ground, 300 metric tons of roots for the equatorial forest).

No illusions should be cherished about the importance of the reserves in the forest soils. These lands may, in fact, be considered rich only in a very relative way, and the great extent of the root system of certain species must be taken into account. But

the forest may be considered, more or less, to be substantially in equilibrium with the environment in which it is formed: the vegetable debris returns to the soil almost everything taken previously from it by the trees and plants. Removals on too great a scale will not be unattended by danger.

To obtain high crop yields, one must realize a judicious equilibrium between the various factors discussed, particularly between the light, temperature and humidity; these conditions may differ considerably according to the species being cultivated, and, in general, vary appreciably during the growth of a given plant.

Since the building of a hot-house is relatively costly, the crops grown in them must necessarily be intensive and be organized rationally from the human point of view.

Such installations are of no real interest outside the arid regions, where the days are sunlit, and the night sky is clear, which is an essential factor in limiting the average temperature of the hot-house. The humid equatorial and tropical zones have no need of such arrangements, and they could not operate there anyway.

If 20 per cent of the solar radiation is considered sufficient to illuminate the plants, 80 per cent will be available for distillation of water. With equal transparent wall surfaces, four-fifths of the distilled water delivered by a simple still will thus be produced with hot-houses.

The most sensitive factor to be determined is the amount of water required by the crops per m<sup>2</sup>, or, in other words, the useful cultural surface to be protected, related to the surface of the water pans. Obviously, and to a great extent, everything depends on the crops to be grown, and only experiments scientifically conducted will permit their determination. Assuming, nevertheless, that an annual water depth of 0.50 m would be sufficient, under water-saving conditions, a surface equal to twice the hot-house soil surface could be cultivated under these conditions, or to 1.5 times the surface of the hot-house soil, assuming certain losses due to the aeration. Culture beds placed half way up would permit utilization of this water inside the hot-house itself. Under these conditions, the total surface to be covered would be of the order of 1 for the distilling and cultivating hot-house, of 0.8 for the simple still, and of 0.8 to 1.5 = 2.3 for the cultures under water-saving conditions, or 2 or 2.5 times more surface for the double set-up. On the other hand, the distilling hot-house requires elevation of the pans over the cultural surface. The cost of the supports for these pans and the cost of the peripheral walls would thus have to be taken into account. These walls should be diminished as much as possible, while increasing the surface of the hot-houses.

The climate most easily produced here being both hot and humid, it would be more useful to take this fact into account in selecting the crops to be grown. Good results should be obtained in this way

with manioc, sweet potatoes or yams, or with certain green vegetables, such as salads (escarole above all), tomatoes and eggplants.

### Remarks on the cost

Such hot-houses would not cost very much more than ordinary hot-houses, from which they differ essentially in the water distillation arrangement at the top. A hot-house of  $6 \times 3 \text{ m} = 18 \text{ m}^2$  useful surface cost 7 400 NF: material, 3 400 NF (iron shapes, 1 340 NF; sheet metal, 690 NF; glass, 600 NF; heat insulation, 360 NF; concrete, 170 NF); and labour, 4 000 NF. This makes about 400 NF per sq m. It should be emphasized that this was only a small hot-house, for which the lateral walls are a rather important element of cost. For very large hot-houses, the cost might be cut in half.

The labour cost could be substantially decreased by using special shapes with perforated angle pieces. The employment of such a relatively light material would very greatly decrease the transportation cost. Thus the iron shapes required to build a platform 2 m high, able to carry  $60 \text{ kg/m}^2$ , and also to support the glass (or plastic) panes, would cost about 50 NF per sq m for a very large hot-house<sup>2</sup> (slight influence of the lateral walls). Taking account of the cost of the glass, the water distillation tanks, and the labour, the total cost would not exceed 200 NF per sq m.

At first glance, one might think of replacing the hot-houses, as we have described them, by a set

<sup>2</sup> Such supports can be built by using, side by side, several of the elements described above.

of separate apparatus, comprising water stills and arrangements for culture on a water-saving basis. To be satisfactory, the set-up for economizing water would have to have facilities for limiting the temperature, controlling the humidity, providing measured quantities of light, and providing convenient access to the plants.

The construction of the platform, which distinguishes this type of equipment from the conventional hot-house, has only a rather slight effect on the total construction cost.

The use of simple coverings of plastic, which are very inexpensive, permits operation under water-saving conditions, although it does not realize conditions comparable to those in the hot-houses just described. To approach these conditions somewhat, outside screens would be required, to limit the action of the solar radiation. Any comparison with such equipment would thus be very difficult, especially since the present use of plastic sheets in agriculture is essentially seasonal and it is often not easy to salvage the material after a single use.

At the present time, we envisage in the near future the construction of a large hot-house in the Sahara. This area has climatic conditions very favourable for such an experiment. The latitudes are rather low, the sunshine is intense, the sky clear, the atmosphere very dry. There is a large day-to-night temperature variation. The economic conditions are also excellent: almost no fresh vegetables are produced, or any other food products, for that matter, particularly in the neighbourhood of the new centres that have grown up around the mines and oil-well concessions.

### References

For references, see end of French version.

### Summary

Arid and sunlit regions often have considerable amounts of brackish water that can be used, after distillation, for human or animal consumption, and for plants. On the other hand, the dryness of the atmosphere sharply restricts the possibilities of plant culture, since the water evaporates rapidly and only a small fraction is really used by the plants.

A special type of hot-house has been designed and built at the Mont-Louis Laboratory of Solar Energy; it permits the distillation of brackish water and, at the same time, plant culture under water-saving conditions.

These hot-houses comprise: (a) a roof glazed or covered with transparent plastic, serving as a condenser for the distilled water; (b) immediately below it,

tanks filled with brackish water, which absorb the larger part of the solar energy; (c) space, over the entire planting surface of the hot-house, and sufficiently high above it (about 2 m), to give a climate independent of that existing directly underneath the panes.

Both illumination and temperature can be regulated by increasing or decreasing the relative area of the water tanks. Aluminium screens placed under these tanks limit the radiation from these tanks on the plants, and prevent overheating of the plants. At night, the cold air formed at the upper part of the panes descends to the lower part of the hot-house, thus helping to lower its temperature. In general, the average temperature should not exceed



the average outside temperature, but the diurnal range of temperature will be far narrower than those observed in arid and sunlit regions (about 15°C).

The amount of water available on the cultivable surface of this hot-house may reach 1 000 l/m<sup>2</sup>, which is often more than abundant when operating under water-saving conditions. The relative humidity of the atmosphere near the cultures is conditioned by the sunlight received directly in the hot-house and by the introduction of outside air.

This arrangement also prevents the erosion of the soil by the wind, as well as the leaching of mineral salts by the torrential rains. It likewise provides extremely effective protection against various pests, especially against insects.

Favourable tests have been run on small elements. A hot-house 6 m long (in a west-east direction), 3 m wide and 3 m high (2 m under the tanks) has been installed at the Banyuls Marine Laboratory (Faculty of Science, University of Paris), and tests are now in progress. Another installation of the same

type, but much larger, is to be built in 1961 in Sahara.

The protective vault formed by the transparent wall yields a micro-climate inside the hot-house which has certain analogies to that observed in the shade of certain trees. According to the arrangement of the various parts of the hot-house, and in particular that of the water distillation tanks, one may obtain conditions approaching those in tropical forest undergrowth, the conditions of the palm grove, or those of other types of intermediate climate.

Cultivation must necessarily be intensive.

Such hot-houses are not very much more expensive than the conventional types, from which they differ essentially in the arrangement for distilling water located in their upper part. One might also imagine locating the water stills and the water-saving hot-houses separately, but the possibilities of culture in such separate hot-houses would differ greatly from those of the arrangement discussed here, and would be much inferior to them, without diminishing the cost of the installation.

## PRINCIPES DE CLIMATISATION DES MAISONS DANS LES PAYS A CIEL CLAIR

F. Trombe et Ch. Henry La Blanchetais \*

Climatiser une maison consiste à modifier le climat qu'elle présente naturellement pour rendre son habitat plus supportable et même agréable à l'homme. Celui-ci est sensible, particulièrement, à la température, à l'état hygrométrique de l'air et aux possibilités qui lui sont offertes de pertes ou de réception d'énergie par rayonnement. Ce que l'on appelle les *conditions d'euphorie* pour l'homme au repos se situe entre certaines limites de température de l'air et des parois des habitations et certaines limites d'humidité relative de l'air. La figure 1 donne une idée de ces limites pour la température et l'humidité relative.

Pour l'état hygrométrique, les conditions les plus agréables se situent entre 25 et 60 p. 100 d'humidité relative et pour des températures de 5 à 25°, étant bien entendu que l'homme au repos supporte difficilement, en permanence, des températures au-dessous de 10 °C et que l'homme en activité, au contraire, accepte beaucoup mieux des températures au-dessous de 20 °C.

Les conditions d'euphorie sont également tributaires du climat de rayonnement : vie à l'extérieur avec possibilité de rayonnement du corps sur l'espace et réception par le corps du rayonnement de surfaces diverses (cas de surfaces froides ou de surfaces surchauffées), vie à l'intérieur des habitations dont les surfaces échangeant leur énergie avec le corps peuvent être plus chaudes ou plus froides que l'air ambiant. Les mouvements de l'air, brise, vent faible, vent fort ou ventilation, ont également une grande importance pour les climats extérieurs et internes.

La climatisation la plus facile à réaliser, dans une habitation, consiste à réchauffer artificiellement un air humide et froid et à abaisser, de ce fait, son humidité relative; par exemple, en nous référant à la figure 1, un air saturé d'eau à 0 °C, réchauffé à 20 °C, aura une humidité relative de l'ordre de 40 p. 100, ce qui représente une ambiance excellente pour l'habitat humain. Par contre, un air encore plus froid, réchauffé à la même température, sera sec et irritant. On a souvent des airs trop secs dans les habitations à chauffage central, dont la température moyenne est, en général, élevée. Le remède couramment employé consiste à laisser s'évaporer au contact des sources de chaleur une certaine quantité d'eau dans l'atmosphère pour relever l'humidité relative à une valeur convenable. La climatisation est plus

malaisée à obtenir lorsqu'il s'agit de refroidir un air trop chaud; parfois, on doit également désaturer cet air, car son refroidissement peut conduire au voisinage de la courbe de rosée (figure 1) et donner des ambiances désagréables et même pénibles.

Le problème que nous examinerons ici est celui du chauffage et du refroidissement des habitations dans les pays à ciel clair, soit les pays froids, par exemple certaines régions de montagne, soit les pays chauds, type Sahara. Ces pays sont caractérisés les uns et les autres par de grands ensoleillements, un air très sec et une grande variation de température entre le jour et la nuit.

Dans de telles régions, type froid, le réchauffement de l'air conduira à un état hygrométrique encore plus faible que l'état initial. On devra donc pour obtenir une climatisation convenable provoquer à l'intérieur des habitations, comme nous l'avons dit plus haut, des apports de vapeur d'eau.

Par contre, dans les régions à ciel clair, type chaud, le refroidissement de l'air (voir figure 1) conduira le plus souvent à un état hygrométrique convenable, tout en étant encore assez bas et favorable à l'élimination des calories par sudation. Par exemple, un air initialement à 15 p. 100 d'humidité relative et à 35 °C aura par simple refroidissement à 25 °C une humidité relative de 25 p. 100.

On a envisagé d'utiliser la siccité initiale de l'air pour obtenir son refroidissement en le saturant partiellement en vapeur d'eau. La chaleur d'évaporation de l'eau étant d'environ 600 grandes calories par kilogramme, on peut avoir ainsi à partir d'un air sec et chaud, type saharien, par exemple à 35 °C et 15 p. 100 d'humidité relative, des abaissements de température de 6 à 8°. L'humidité relative passe alors à 70 p. 100. Il faut signaler que, dans ce cas, le « grain d'euphorie » sera faible, car l'ambiance obtenue, 27 à 29 °C et 70 p. 100 d'état hygrométrique, sera à peu près aussi pénible que l'ambiance initiale. De plus, les états hygrométriques élevés à de telles températures favorisent les développements de micro-organismes (moisissures). Il serait, par contre, plus intéressant d'utiliser les effets thermiques dus à la saturation de l'air, à condition que l'air saturé ne participe pas directement à la climatisation. Des dispositifs à circulation alternée ou à échange permettraient d'utiliser rationnellement les effets frigorifiques de la saturation de l'air, tout en conservant les avantages d'une faible valeur de l'humidité relative. Naturellement, ces effets pourraient s'ajouter à ceux produits par les méthodes dont il est question dans ce rapport.

\* Laboratoire de l'énergie solaire du Centre national de la recherche scientifique, Mont-Louis, Pyrénées-Orientales, France.

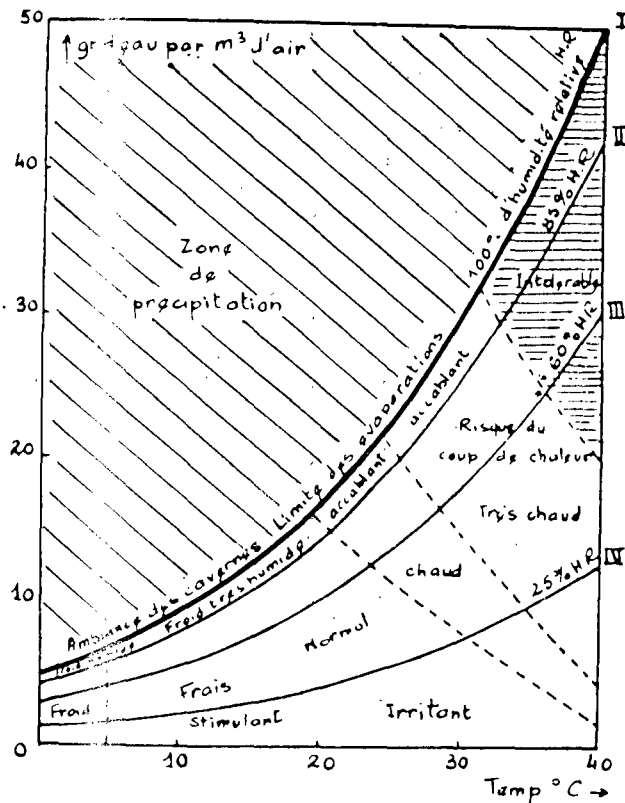


Figure 1

### Principes de la climatisation naturelle des habitations

Dans tout climat, on observe des variations annuelles et journalières de température et d'état hygrométrique. Ce sont les amplitudes de ces variations, particulièrement celles de la température, qui permettent de définir de nombreux types de climat. Nous n'examinerons ici que le cas des pays à ciel clair caractérisés par des variations annuelles de température assez importantes et, surtout, des variations journalières de très grande amplitude. Dans ces pays, l'état hygrométrique peut atteindre parfois des valeurs élevées, mais il est en général faible.

Les variations de température journalières peuvent, dans les pays à ciel clair, dépasser 20 °C. Il est bien connu qu'au Sahara les journées sont torrides et les nuits glaciales. De plus, ce sont là les variations de température de l'air; or, l'air empruntant la plus grande partie de ses calories aux corps terrestres, ceux-ci doivent être soumis à des variations de température très supérieures à celles de l'air. L'expérience montre que les corps terrestres subissent des variations de température qui peuvent parfois dépasser à l'air libre 60 °C. On aura par exemple (figure 2) la courbe A'B'C' représentant les variations de température d'un corps noir responsable des variations de température de l'air A,B,C.

L'origine de ces variations est due à deux facteurs antagonistes : le rayonnement solaire et le rayonne-

ment terrestre, ou perte d'énergie infrarouge des surfaces sur l'espace. Rappelons que cette perte d'énergie représente la différence entre le rayonnement infrarouge propre de ces surfaces et le rayonnement infrarouge qu'elles reçoivent de l'atmosphère. Le jour, les corps soumis à l'action du soleil s'échauffent, certains relativement peu, d'autres beaucoup; la nuit, certaines surfaces terrestres sont refroidies par leur propre rayonnement vers l'espace. Certains corps rayonnent beaucoup et sont bien plus froids que l'air ambiant, d'autres rayonnent peu et prennent pratiquement la température de l'air.

L'idée générale de la climatisation naturelle consiste à exploiter rationnellement les variations de température de surfaces terrestres pour obtenir des élévations ou des diminutions de la température moyenne des habitations. De plus, un choix rationnel des qualités optiques des surfaces réceptrices permet d'augmenter les effets obtenus dans le sens recherché.

### PREMIER PRINCIPE DE LA CLIMATISATION NATURELLE

Le premier principe de la climatisation naturelle consiste à capter sélectivement les calories localisées sur la surface terrestre. Par exemple, une surface terrestre solidaire d'une masse thermique suffisante et se conduisant comme le corps noir de la figure 2 prendra la température résultante représentant la « somme » de toutes les températures de la courbe A'B'C'. Le résultat sera différent si, par un artifice quelconque, on supprime à certaines heures les apports calorifiques extérieurs. L'isolement, le jour, aux heures de soleil, conduira à abaisser la température moyenne; l'isolement, la nuit, à l'augmenter. C'est ce que l'on fait d'une manière approximative en protégeant les lieux d'habitation du rayonnement solaire ou du froid de la nuit par des écrans disposés convenablement.

Examinons maintenant le problème en supposant que la masse thermique des surfaces réceptrices du rayonnement solaire ou des surfaces émettant de l'énergie sur l'espace soit faible. Ces surfaces prendront très vite la température d'équilibre. Exposées au soleil, elles s'échaufferont rapidement; mais elles se refroidiront également très vite, par leur perte d'énergie sur l'espace et leurs échanges avec l'air, dès que cessera le rayonnement solaire. Le moyen d'emprunter sélectivement des calories (dans le sens chaud ou dans le sens froid) aux surfaces précédentes consistera à utiliser un fluide intermédiaire, de préférence gazeux, qui transportera ces calories dans les locaux d'habitation. Le transport sélectif (froid ou chaud) est obtenu sans l'intervention d'aucun agent moteur, en utilisant simplement d'une manière rationnelle les *pressions motrices* créées par les différences de densité entre l'air chaud ou froid produit au contact des surfaces chauffées ou refroidies et l'air des habitations.

Examinons, pour illustrer ce qui précède, le schéma de la figure 3, qui représente une pièce munie d'un vitrage derrière lequel se trouve un rideau permettant à l'air de circuler de haut en bas et de bas en haut.

Ainsi disposé, le rideau ne s'opposera pas aux apports thermiques provenant de l'extérieur. Le jour, il sera frappé par le soleil, s'échauffera et il se produira une colonne d'air plus chaud que celui de la pièce et, par conséquent, moins dense; une circulation d'air *de bas en haut* entre rideau et vitrage apportera des calories au milieu intérieur. La nuit, le vitrage rayonnant sur l'espace et échangeant des calories avec l'air extérieur se refroidira et refroidira l'air placé à son contact. Un courant d'air *de haut en bas* s'établira, l'air entre rideau et vitrage étant encore plus froid que celui de la pièce et, par conséquent, plus dense. Le système ne présente qu'un caractère sélectif médiocre dû à la protection du vitrage; la température moyenne de la pièce sera assez peu différente de celle qui correspond à la somme des apports thermiques du jour et de la nuit.

Imaginons maintenant d'obturer complètement, avec le rideau, la base et les côtés du vitrage (simple ou double) en laissant le passage supérieur (figure 4). Le jour, l'intervention des rayons du soleil, ou même

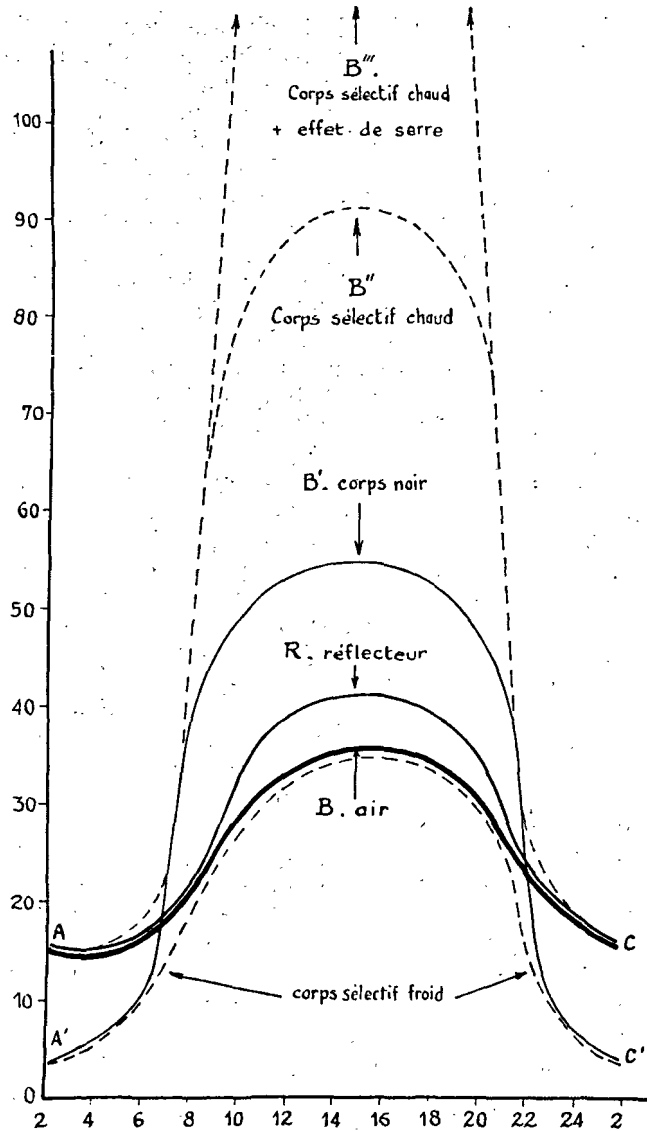


Figure 2

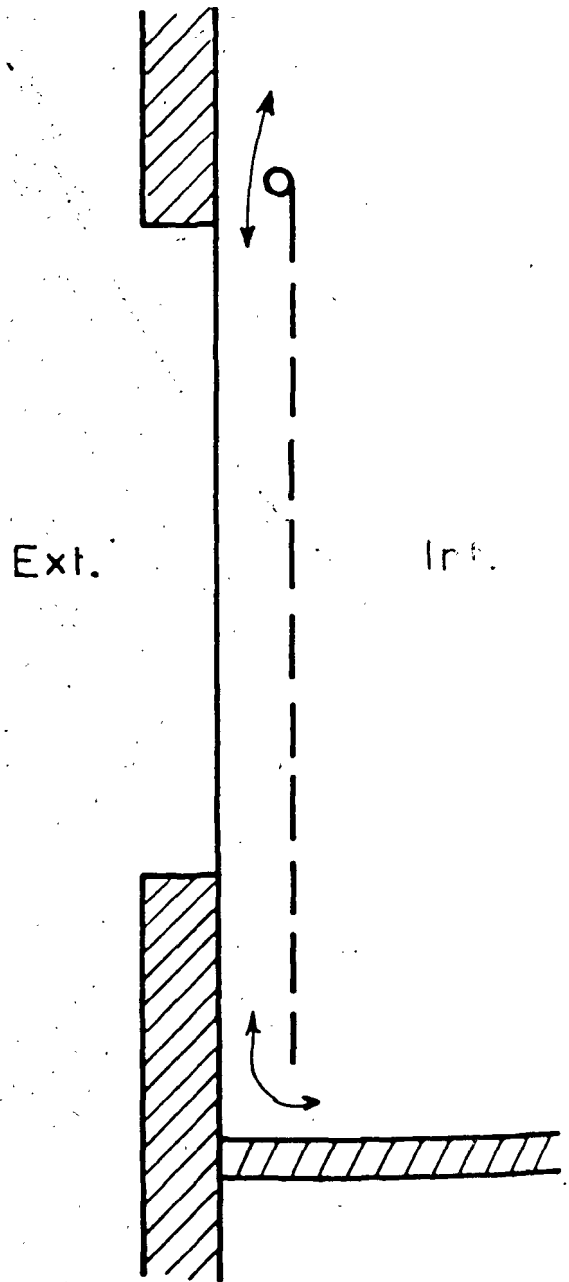


Figure 3

l'élévation de température extérieure échauffant le vitrage, pourra échauffer l'air compris entre rideau et vitrage, suffisamment pour qu'il soit plus chaud que l'air de la pièce. Étant plus chaud, il sera moins dense et ira dans la pièce en étant remplacé par un air plus froid provenant de celle-ci. Une circulation s'établira limitée, dans le cas de la figure 4, par l'échauffement localisé de l'air de la partie supérieure de la pièce. On pourra, pour éviter cet inconvénient, répéter le motif de rideau le long de la paroi vitrée, ce qui permettra de débiter de l'air chaud à différentes hauteurs de la pièce à chauffer (figure 5). Le comportement du système précédent, la nuit ou en l'absence de soleil, montre son rôle sélectif. L'air entre rideau et vitrage est refroidi au contact du vitrage, refroidi lui-même par rayonnement et

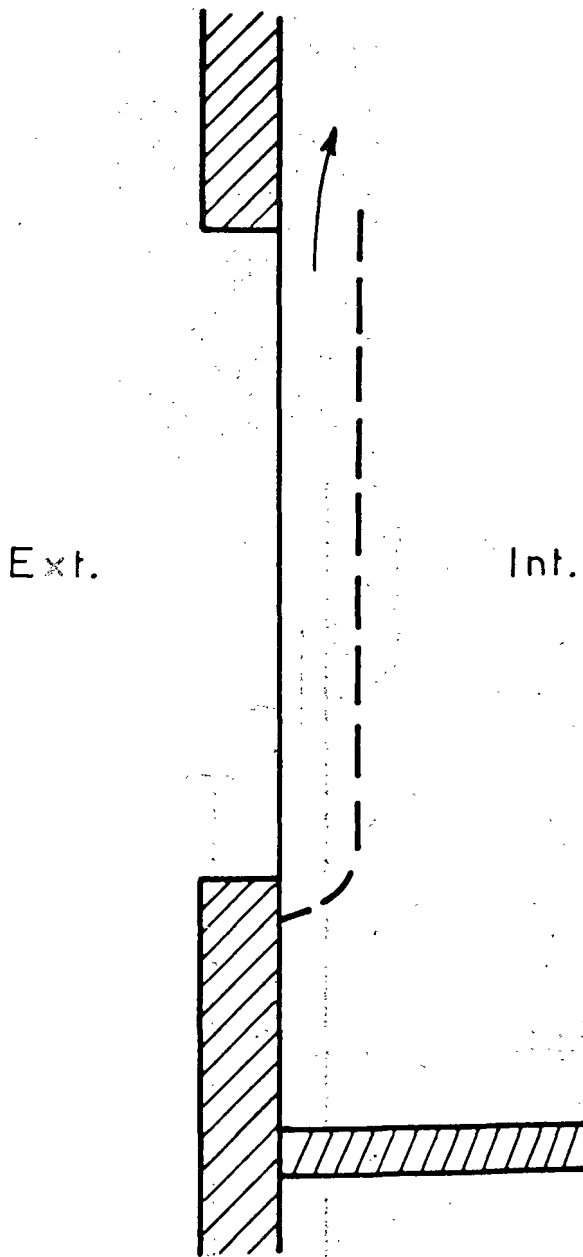


Figure 4

échange. Cet air est plus froid et, par conséquent, plus lourd que celui de la pièce; il restera de ce fait enfermé dans la poche constituée par le rideau et le vitrage et n'apportera pas de froid au milieu intérieur. On aura réalisé, par un dispositif simple ne comportant aucune dépense d'énergie, un captage sélectif de calories.

Si maintenant, l'obturation du rideau est faite en haut au lieu d'en bas (figure 6), les échanges seront sélectifs dans l'autre sens. L'air chauffé par le soleil, de densité relative plus faible, restera enfermé dans la poche du rideau; il n'ira pas dans la pièce. Par contre, l'air froid, produit la nuit, plus dense, aura la liberté de s'écouler le long de la paroi vitrée et dans la pièce. On aura réalisé un sélecteur de froid conduisant la pièce en question à prendre une tempé-

rature moyenne, inférieure à la « somme » des températures extérieures. Par ailleurs, dans ce dernier cas, il ne sera plus nécessaire de disposer d'un vitrage, mais seulement d'une paroi opaque, tôle par exemple.

Des dispositifs permettant des séparations plus complètes d'air froid et d'air chaud peuvent être adoptés (figure 7 : échauffement; figures 8 et 9 : refroidissement). Sur la figure 7 est représenté un système de captage d'air chaud dans lequel le dispositif de chauffage se trouve situé entièrement en dessous de la pièce à chauffer. Cette disposition, quand elle peut être adoptée, est tout à fait rationnelle, car le système chauffant peut être d'une seule pièce, présenter une hauteur suffisante et le volume total de l'air de la pièce à climatiser passe progressivement dans le circuit chauffant. L'air chaud produit se localise dans le haut et est remplacé par de l'air froid entrant dans le circuit B et pro-

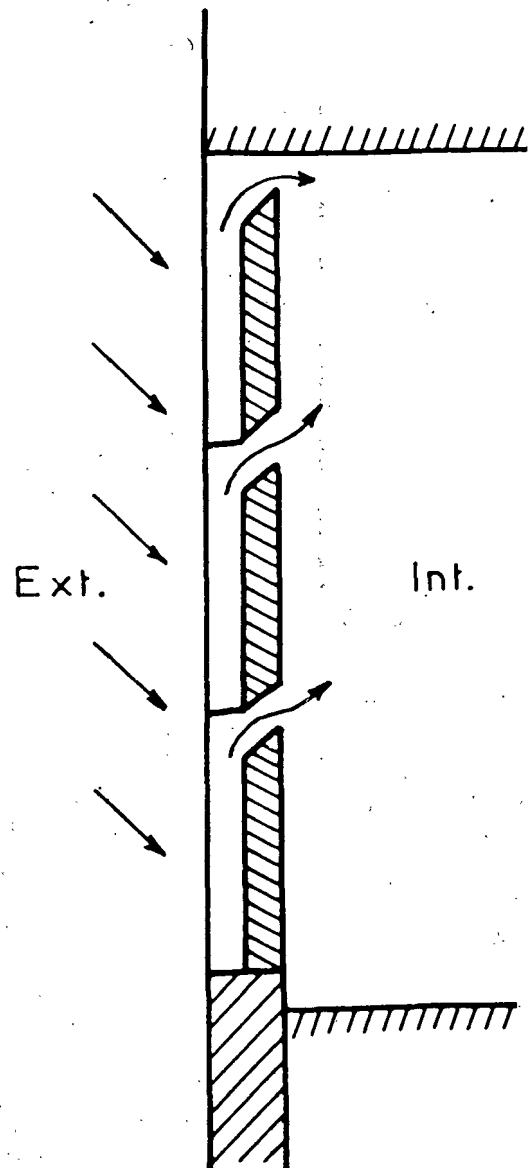


Figure 5

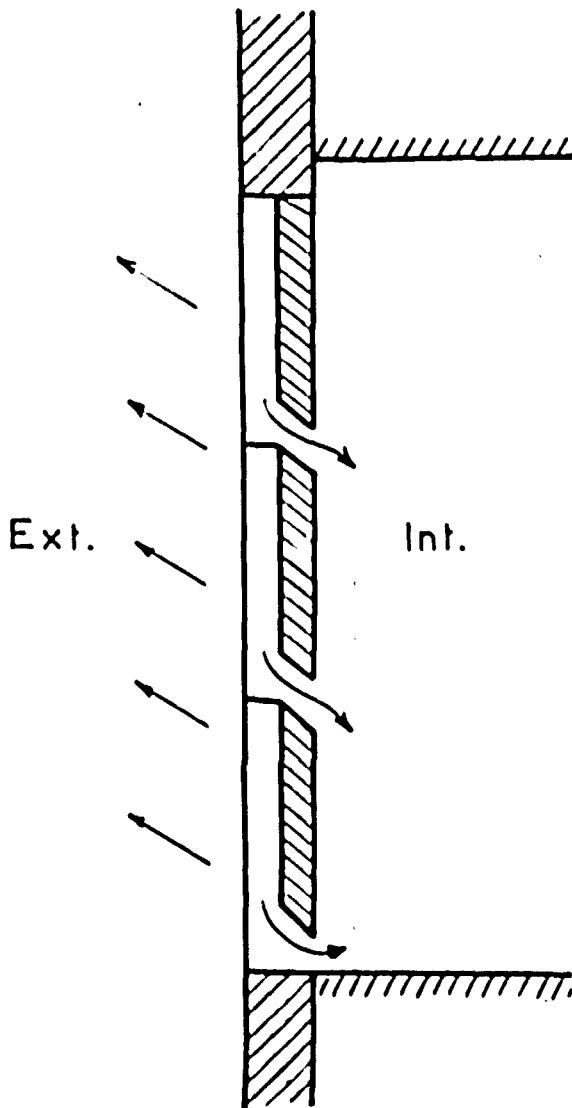


Figure 6

venant du niveau du sol. Les mêmes observations sont à faire pour le schéma de la figure 8, qui comporte un circuit refroidissant situé au-dessus de la pièce à climatiser. L'aménagement rationnel du schéma de la figure 8 conduit à celui de la figure 9 qui montre l'utilisation du rayonnement d'une toiture sélective pour le refroidissement d'une pièce située immédiatement au-dessous. C'est ce schéma qui sera généralisé et perfectionné pour les réalisations des maisons refroidies.

#### DEUXIÈME PRINCIPE DE LA CLIMATISATION NATURELLE

Le deuxième principe de la climatisation naturelle consiste à superposer aux méthodes de captage sélectif indiquées plus haut des effets sélectifs dus aux propriétés optiques des surfaces ou des montages utilisés. Avant d'aborder la description des systèmes

sélectifs que nous appellerons optiques, il est nécessaire de préciser quelques caractères de rayonnements qui interviendront pour apporter des calories (rayonnement solaire) ou pour en soustraire (rayonnement terrestre) au milieu ambiant.

Le rayonnement solaire est caractérisé par une répartition énergétique pratiquement comprise entre 0,3 et 3  $\mu$  (voir figure 10), c'est-à-dire allant de l'ultraviolet au proche infrarouge. Quelques p. 100 de l'énergie apportée sont dus à l'ultraviolet, un peu moins de 50 p. 100 à ce que nous appelons le visible et 50 p. 100 environ à l'infrarouge proche 0,8 à 3  $\mu$ . L'apport global d'énergie du rayonnement solaire dépasse 1 350 W/m<sup>2</sup> au niveau de la stratosphère. Il est de l'ordre de un kilowatt par mètre

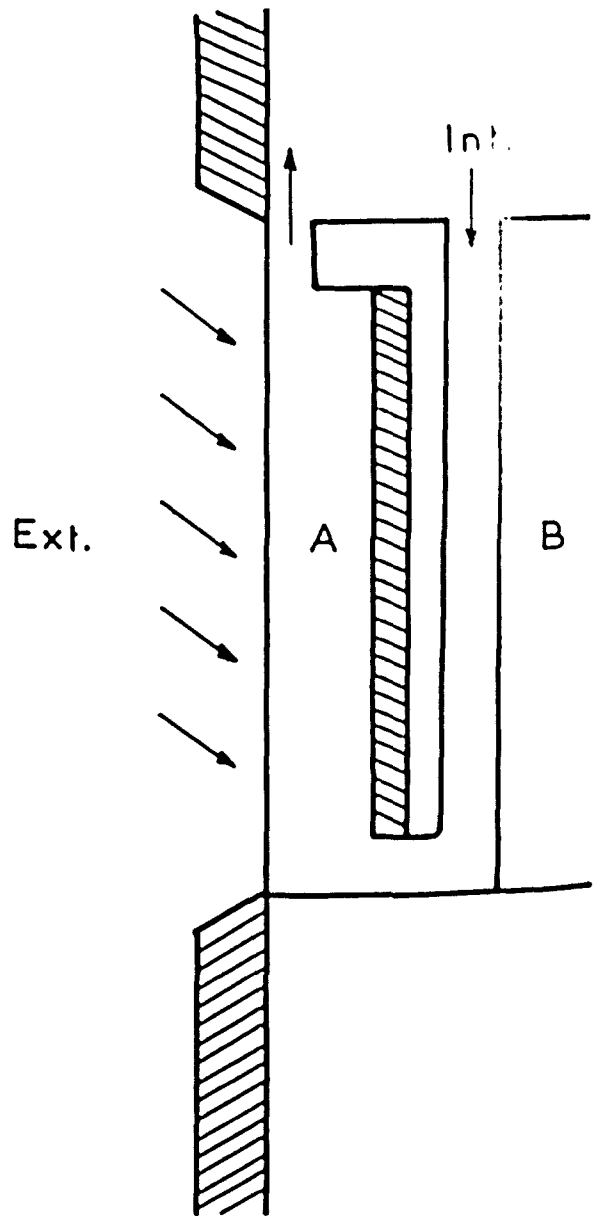


Figure 7

carré de surface inclinée (normale à la direction du soleil) au niveau du sol terrestre. Cette valeur est couramment obtenue dans les pays à ciel clair.

Le rayonnement terrestre ou rayonnement propre des corps portés au voisinage de la température ordinaire est loin d'être négligeable au point de vue énergétique; la figure 11 montre que, théoriquement, le rayonnement d'un corps noir à 0 °C est de l'ordre de 300 Watts/m<sup>2</sup>, soit le tiers de l'énergie reçue du soleil; à 100 °C l'énergie rayonnée par le corps noir serait égale à l'énergie reçue du soleil, soit 1 kW/m<sup>2</sup>. Cette équivalence est due au fait que les surfaces terrestres rayonnent leur énergie, en général, sous un angle solide bien plus élevé (voisin de 2 $\pi$  stéradian) que celui sous lequel elles reçoivent le rayonnement solaire issu d'une source très éloignée de la terre et dont le diamètre apparent moyen est seulement de 32' d'arc. Les valeurs indiquées plus haut pour le rayonnement théorique du corps noir porté à

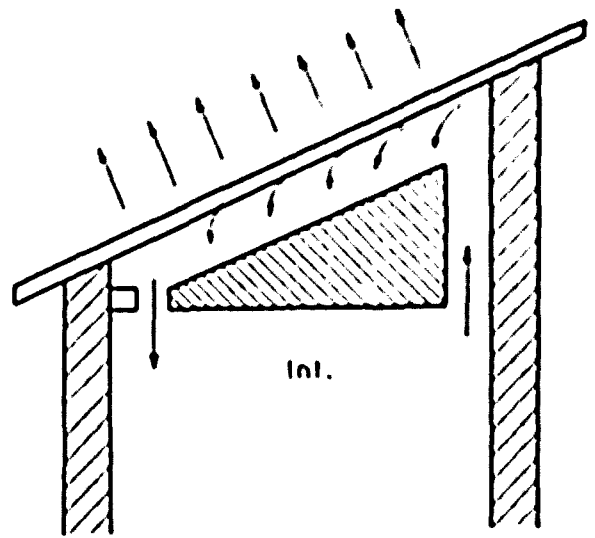


Figure 9

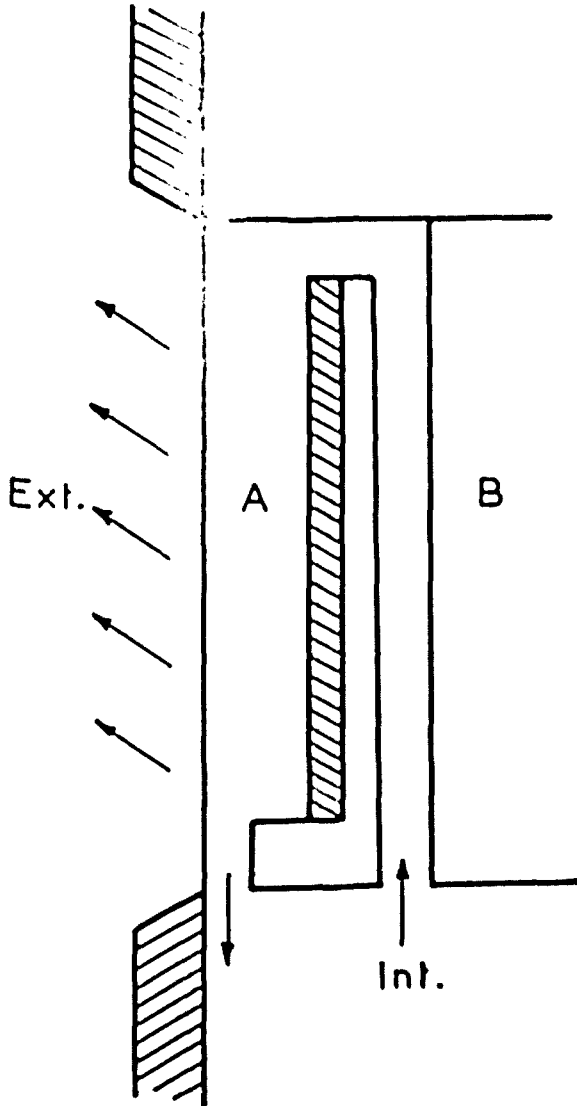


Figure 8

différentes températures sont loin de correspondre aux valeurs observées pour le rayonnement dit « terrestre ». Les pertes d'énergie réelles résultantes des surfaces « corps noirs », même dans les ciels les plus clairs à des altitudes de l'ordre de 1 000 mètres, ne dépassant guère 150 watts pour des températures d'émission voisines de la température ordinaire. Cela veut dire que l'atmosphère terrestre, même celle qui est apparemment très claire et transparente, émet, sur les surfaces terrestres, un rayonnement infrarouge au moins égal à la moitié du rayonnement théorique du corps noir vers 0 °C (voir contre, figure 11). Un autre caractère du rayonnement terrestre est le domaine des longueurs d'onde dans lequel il émet son énergie. La figure 12 montre les courbes de répartition spectrale énergétique pour les corps noirs portés à des températures de 252, 272, 293 et 313 °K, soit -20, 0, 20 et 40 °C. Pratiquement, pour ces domaines de température, l'énergie émise pour les longueurs d'onde inférieures à 4  $\mu$  est négligeable. Les maxima d'émission sont situés entre 10 et 12  $\mu$  et les courbes s'étalent au-delà de 24  $\mu$ . Le rayonnement propre des surfaces terrestres se trouve donc situé assez loin dans l'infrarouge, il est bien séparé du rayonnement solaire.

Le principe des apports effectifs de chaleur par l'exploitation rationnelle des caractères optiques des rayonnements repose sur les idées suivantes. En dehors du corps noir qui est un émetteur et un absorbeur d'énergie intégral, aucun bon point de rayonnement solaire que pour le rayonnement terrestre, il existe :

a) Des surfaces réfléchissantes pour les deux rayonnements (l'aluminium non oxydé, par exemple).

b) Des surfaces réfléchissantes des rayons solaires et absorbant comme un corps noir pour le rayonnement terrestre.

c) Des surfaces absorbant le rayonnement solaire et se conduisant comme un réflecteur, c'est-à-dire n'émettant pas d'énergie, pour l'infrarouge entre 4 et 24  $\mu$ .

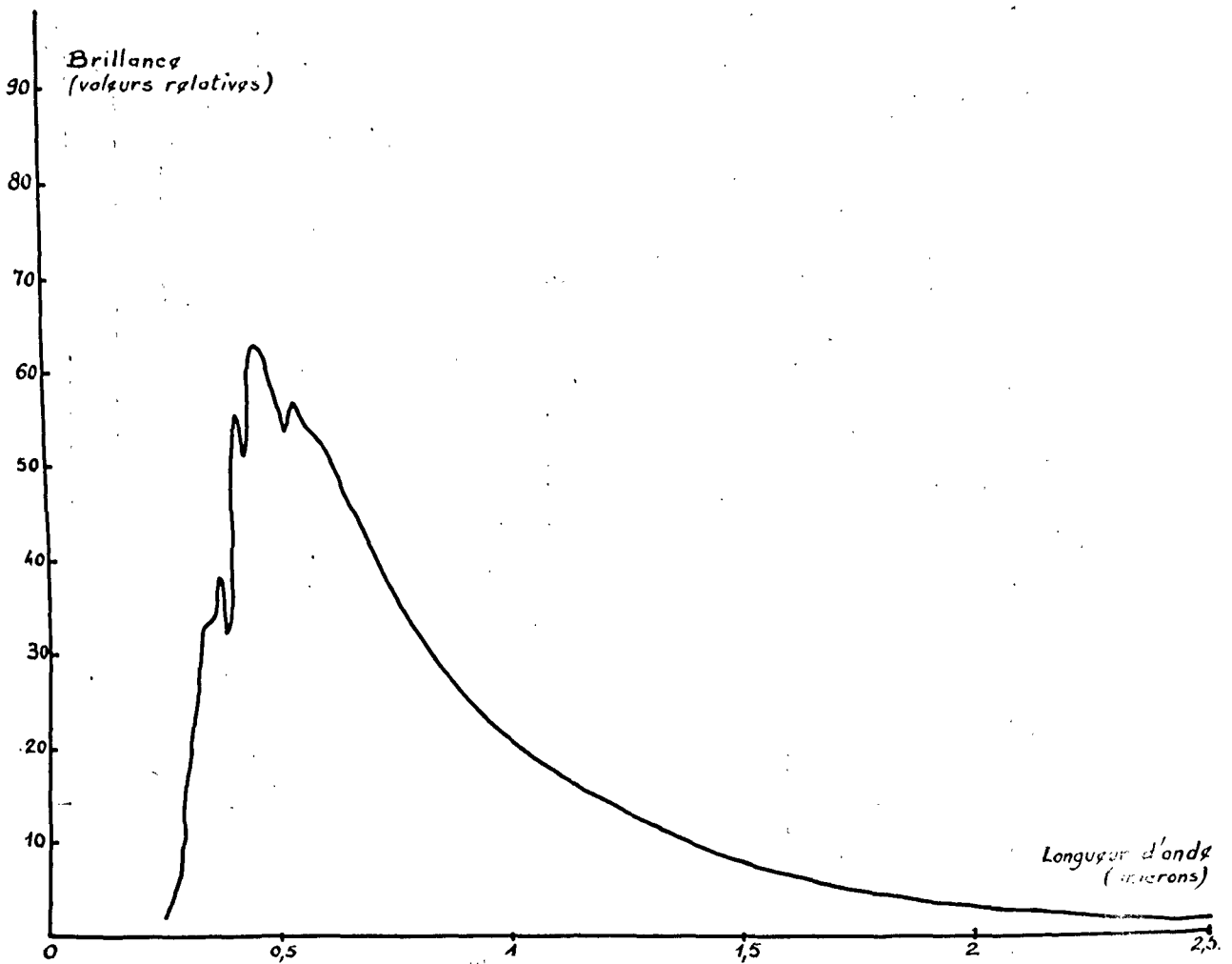


Figure 10

d) D'autres substances, classées dans les *corps transparents pour le rayonnement solaire* sont le plus souvent opaques pour l'ensemble du rayonnement propre terrestre; leur opacité peut être due à leur pouvoir réflecteur élevé, mais le plus souvent ils se conduisent comme des *corps noirs*, c'est-à-dire comme des absorbeurs et émetteurs intégraux pour le rayonnement terrestre ( $4 \mu$  à  $24 \mu$ ).

L'exploitation des propriétés précédentes conduit aux perspectives suivantes (voir figure 2).

a) Un corps réflecteur pour les deux domaines (solaire et terrestre) donnera une courbe de température A,B,C, dont le maximum R est notablement plus élevé que le maximum B donné par l'air ambiant. En effet, le réflecteur intégral ne conserve que très peu de calories du soleil, mais il en perd très peu aussi par son rayonnement propre, et sa température s'élève au-dessus de celle de l'air.

b) Un corps noir intégral, comme nous l'avons déjà vu, donne la courbe A'B'C'.

c) Les corps réfléchissant le soleil et étant corps noir pour le rayonnement terrestre seront des

« *corps sélectifs froids* ». L'expérience montre que les courbes de température journalière peuvent être représentées par A'B'C'; le jour, leurs températures restent au-dessous ou au niveau de l'air ambiant (peu d'énergie reçue du soleil, grande émission d'énergie sur l'espace); la nuit, on observe un abaissement de température notablement au-dessous de celle de l'air ambiant A' et C'.

d) Les corps absorbant le soleil et se conduisant comme des réflecteurs, c'est-à-dire des émetteurs faibles pour leur rayonnement propre seront des « *corps sélectifs chauds* » (figure 2). On peut même aisément, dans certaines conditions, dépasser largement les valeurs indiquées et monter bien au-dessus de  $100^\circ$ .

e) Aux effets précédents peut être ajouté, pour le chauffage par rayonnement solaire, celui qui provient de l'interposition d'une surface transparente entre le rayonnement solaire incident et le corps récepteur (*effet de serre*). L'émission énergétique infrarouge (terrestre) de  $4$  à  $24 \mu$  est bloquée par le vitrage qui s'échauffe et réémet vers l'espace et vers le



corps récepteur une énergie égale. On démontre (FABRY) que la température obtenue sur la surface chauffée peut être égale à celle que donnerait un rayonnement solaire incident de valeur double. L'effet est encore augmenté par l'interposition de

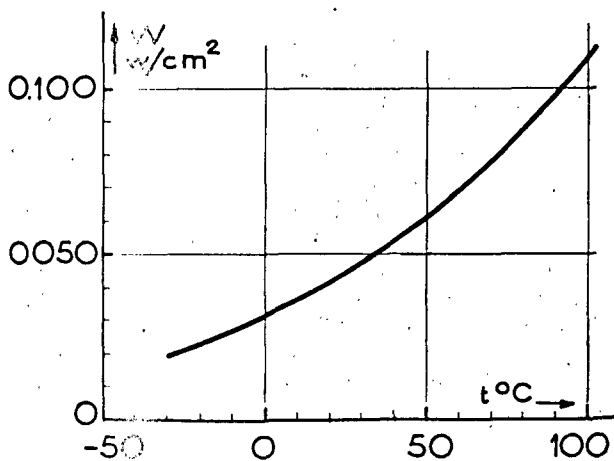


Figure 11

plusieurs vitrages. Par exemple, en l'absence de toute perte par convection, une surface rayonnant librement sur l'espace et soumise à l'action perpendiculaire d'un rayonnement solaire de  $1\text{ kW/m}^2$  atteindrait une température de  $90^\circ\text{C}$  environ. L'interposition d'un vitrage permettrait d'atteindre  $160^\circ\text{C}$ . L'interposition de plusieurs vitrages pourrait conduire à plus de  $200^\circ\text{C}$ . En outre, la combinaison de l'effet de serre et du revêtement « sélectif chaud » conduirait à des températures de surface beaucoup plus grandes (plusieurs centaines de degrés, B", figure 2), et ceci sans aucune concentration du rayonnement solaire incident.

f) Il faut distinguer ici entre l'effet de température obtenu dans les serres chauffantes et le rendement énergétique de ces serres. Avec des vitrages multiples, l'énergie admise sur la surface captante, corps noir ou sélective, est notablement affaiblie par les réflexions du rayonnement solaire sur les vitrages. Il est reçu moins d'énergie, mais en raison de l'isolement thermique, la température de la paroi s'élève très haut, même si elle n'est pas sélective. On obtient expérimentalement, avec cinq vitrages et une énergie solaire incidente normale de  $1\text{ kW/m}^2$ , entre  $165$  et  $190^\circ\text{C}$

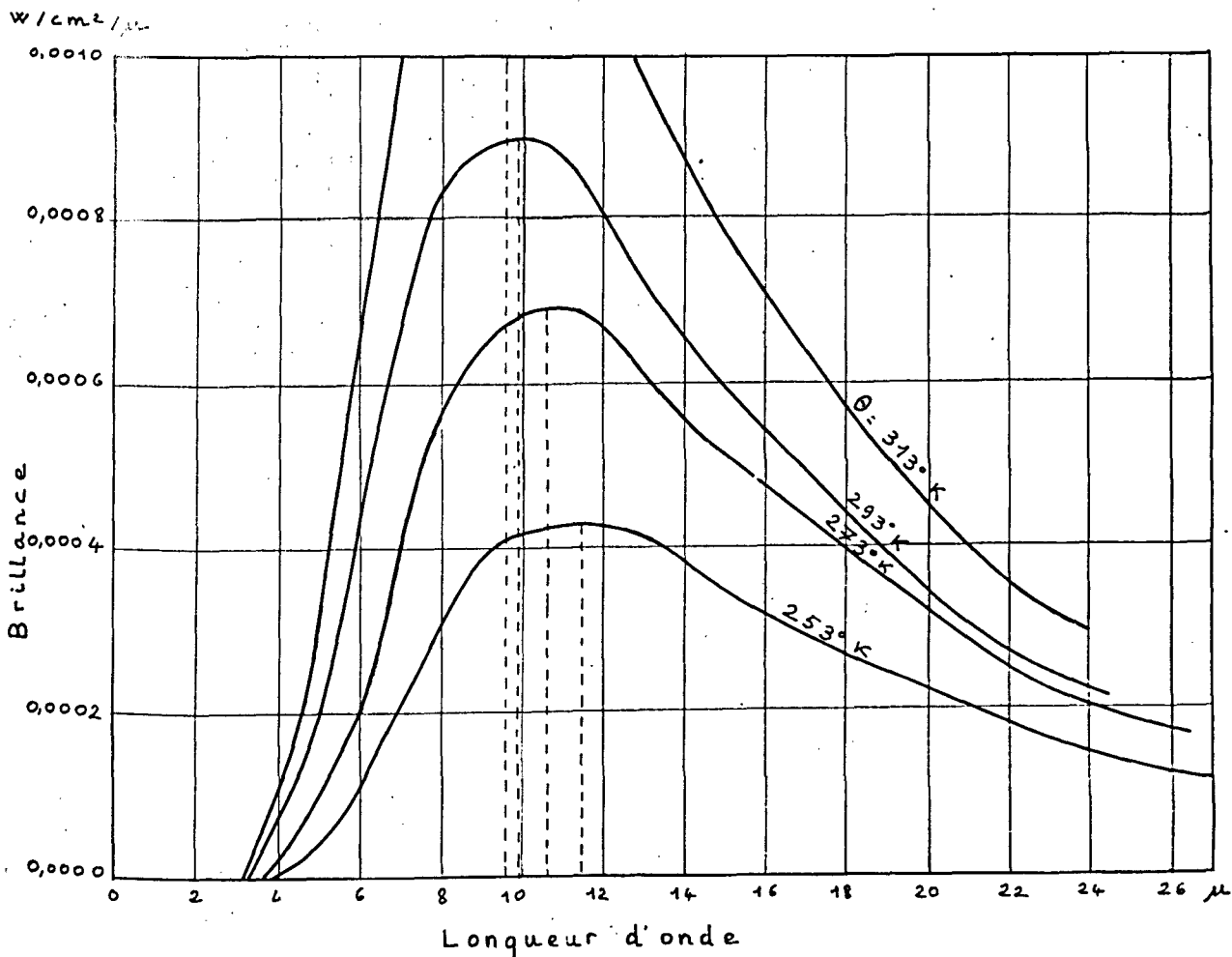


Figure 12

suivant la valeur de la température ambiante. De tels résultats sont exploitables lorsque les systèmes capteurs doivent fournir peu d'énergie par unité de surface. Par contre, lorsque la paroi réceptrice de grande surface doit échanger avec l'air de climatisation le maximum de calories pour donner à la serre chauffante son rendement maximum, le rôle des vitrages multiples est beaucoup plus restreint. Deux vitrages, qui donnent un gain de température de paroi de plusieurs dizaines de degrés et n'affaiblissent pas trop le rayonnement solaire incident; sont certainement utilisables; trois vitrages n'apporteront que des gains relativement faibles. Nous n'insisterons pas sur le dispositif *effet de serre* qui est bien connu et dont nous reparlerons par la suite; par contre, il convient de préciser quelques caractères des surfaces sélectives.

#### Corps sélectifs chauds

Les corps sélectifs chauds sont en général réalisés par formation de dépôts très fins sur des surfaces réfléchissantes, type aluminium ayant un bon facteur de réflexion pour toutes les longueurs d'onde (de 0,3 à 25  $\mu$ ). On obtient ainsi la suppression ou une atténuation de la réflexion des rayons solaires sans modifier les propriétés optiques de la surface en question pour l'infrarouge de 4 à 24  $\mu$ <sup>1</sup>. Les dépôts oxyde de manganèse, oxyde de cuivre, oxyde de nickel sont réalisés dans diverses conditions de pH et de température sur des surfaces métalliques légèrement oxydées au préalable. Si l'effet absorbant pour les rayons solaires n'est que partiel, on peut y remédier en recevant le rayonnement sur des

<sup>1</sup> Voir F. Trombe, M. Foëx et M. Lê Phat Vinh, Recherches sur les surfaces sélectives utilisables pour la climatisation des habitations, *Actes officiels de la Conférence des Nations Unies sur les sources nouvelles d'énergie*, 1961; volume 4, point III B de l'ordre du jour, mémoire S/6.

surfaces pliées de manière à réaliser plusieurs réflexions du même rayon incident.

#### Corps sélectifs froids

Les corps sélectifs froids peuvent être classés en deux catégories : les métaux réflecteurs et les pigments divisés.

*Effets sélectifs des métaux réflecteurs revêtus de surfaces transparentes.* Le cas le plus typique est celui de l'aluminium et de certains de ses alliages, par exemple le Brillalumag (Al à 3 p. 100 de Mg). Ce métal, après laminage, est un réflecteur intégral de 0,3 à 24  $\mu$ . Son facteur d'absorption inférieur de 0,2 pour les longueurs d'onde solaire devient négligeable au-delà de 4  $\mu$  (figure 13, courbe 1). Une étude systématique de l'oxydation<sup>1</sup> a montré que l'aluminium recouvert d'alumine pouvait devenir corps noir pour les grandes longueurs d'onde.

*Effets sélectifs de pigments divisés.* La plupart des composés oxydes-carbonates, etc. sont absorbants pour l'infrarouge correspondant au rayonnement terrestre, et plus ou moins transparents pour le rayonnement solaire. Le facteur de réflexion  $\rho = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$  de ces substances pour le rayonnement solaire est, en général, faible. Pour l'oxyde de zinc, l'indice de réfraction  $n = 2,02$ , on a un facteur de réflexion (visible) de 11 p. 100; pour l'alumine,  $n = 1,76$ ,  $\rho$  visible = 7,5 p. 100; pour l'oxyde de titane,  $\text{TiO}_2$  (Anatase),  $n = 2,55$ ,  $\rho = 19$  p. 100; la variété rutil de  $\text{TiO}_2$  donnerait  $n$  moyen = 2,8 et  $\rho = 20$  p. 100. En procédant à une pulvérisation poussée de ces produits, on arrive à multiplier le nombre de réflexions sans accroître trop l'absorption pour le rayonnement solaire. On constitue ainsi un produit présentant une forte réflexion diffuse pour le rayonnement solaire, tout en conservant un facteur d'absorption ou d'émission important pour l'infra-

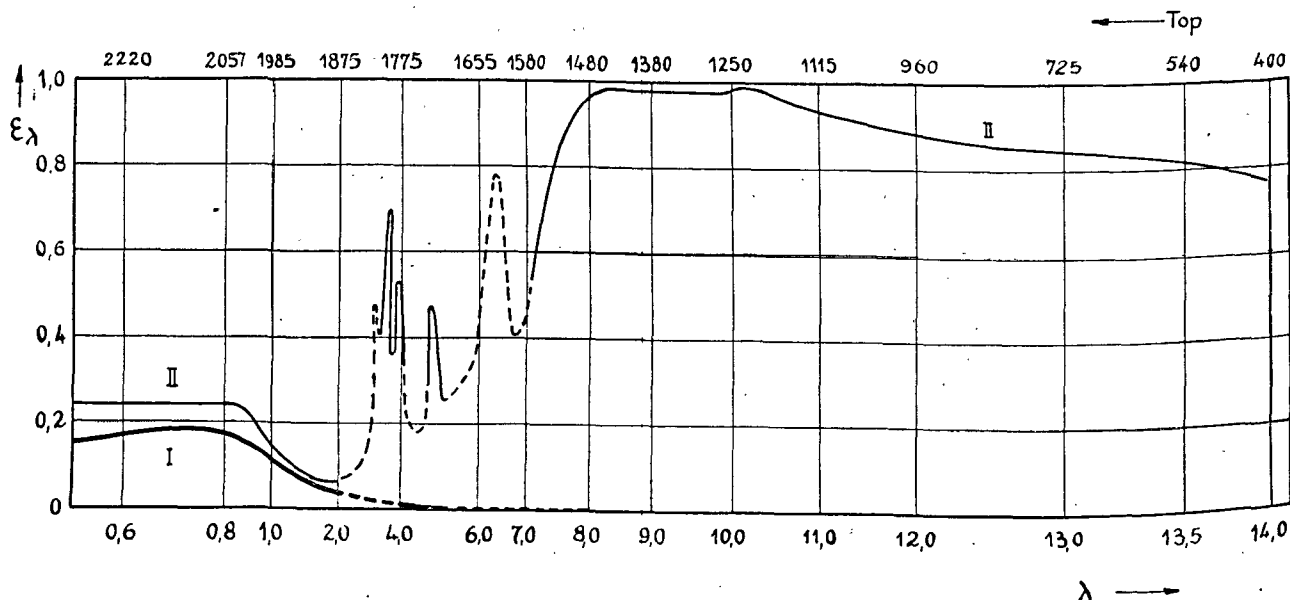


Figure 13

Tableau 1. Pouvoir réflecteur des pigments (d'après Lecomte)

Nature du corps	Réflexion (en pourcentage)				
	0,60	0,95	4,4	8,8	24
Oxyde de cobalt ( $\text{Co}_2\text{O}_3$ ) . . . . .		2,5 à 4	13,9	11,8 à 14,6	5,9
Oxyde de cuivre ( $\text{CuO}$ ) . . . . .		25,3	15,2	—	4,4
Oxyde de chrome ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) . . . . .		44,6	32,9	5,0	8,2
Oxyde de plomb ( $\text{PbO}$ ) . . . . .		—	50,6	25,6	9,5
Oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) . . . . .		41,0	29,9	3,7	9,1
Oxyde d'yttrium ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) . . . . .		—	31,4	11,1	10
Chromate de plomb ( $\text{PbCrO}_4$ ) . . . . .		—	41,2	4,74	7,4
Oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) . . . . .	84,1	87,7	20,8	1,34 à 1,64	6,5
Oxyde de thorium ( $\text{ThO}_2$ ) . . . . .		—	46,9	7,11	10,0
Oxyde de zinc ( $\text{ZnO}$ ) . . . . .	82,2	86,4	8,4	3,2 à 2,1	5,1
Oxyde de magnésium ( $\text{MgO}$ ) . . . . .		—	16,0	2,5	9,1
Oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ) . . . . .		—	22,3	3,6	6,2
Oxyde de zirconium ( $\text{ZrO}_2$ ) . . . . .		84,1	23,2	5,1	5,4
Carbonate de plomb ( $\text{PbCO}_3$ ) . . . . .	86,8 à 89,9	90,8 à 94,5	29,2	8,3 à 13,2	6,9
Carbonate de magnésium ( $\text{MgCO}_3$ ) . . . . .		89,4	10,8	4,1	8,8

rouge lointain. Le tableau 1 (extrait de Lecomte, Gauthiers Villars éditeur, 1949) illustre ce qui précède. On voit également (figure 14) le comportement d'une peinture sélective froide à l'oxyde de zinc. Il est probable que la finesse des grains cristallins (non précisée pour les valeurs indiquées et la figure 14) intervient pour définir la valeur du facteur de réflexion. Nous verrons par la suite les résultats pratiques obtenus avec les peintures chargées de pigments sélectifs. La courbe de la figure 14 est néanmoins, dès maintenant, à rapprocher de celle que donne le béton brut (figure 15). On voit que la surface du béton est à la fois beaucoup plus absorbante pour le rayonnement solaire et plus réfléchissante pour les grandes longueurs d'onde que l'oxyde de zinc. Elle prend donc plus d'énergie que ce dernier et en perd moins; de ce fait, elle s'échauffe beaucoup plus, le jour, sous l'action des rayons solaires et se refroidit aussi moins vite la nuit. A ces inconvénients, il faut ajouter celui de la conductibilité calorifique

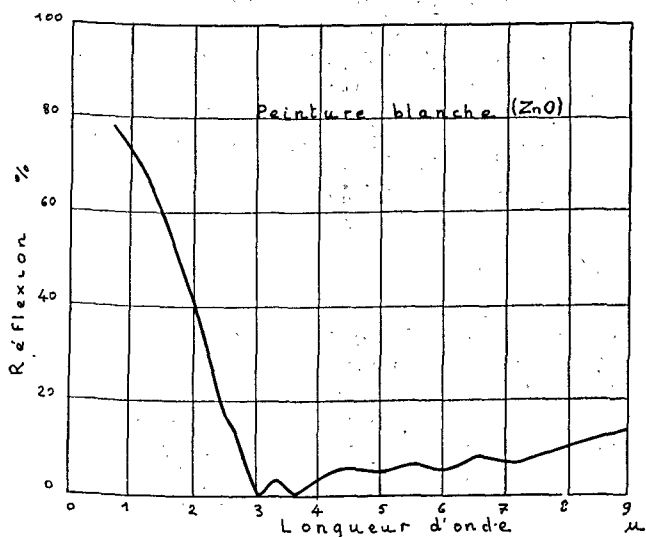


Figure 14

assez élevée du béton conduisant à mettre en jeu, le jour, de très importantes masses thermiques qui interviennent ensuite pour créer, la plus grande partie de la nuit, un climat interne désagréable.

### TROISIÈME PRINCIPE DE LA CLIMATISATION NATURELLE

Le troisième principe de climatisation naturelle consiste à stabiliser autant que possible la température obtenue par les apports thermiques réalisés par l'exploitation des deux principes précédents. L'étanchéité thermique des habitations étant réalisée le plus parfaitement possible avec le minimum de masse thermique, la température la plus favorable à l'habitat sera stabilisée par l'introduction de masses thermiques à l'intérieur même des pièces à climatiser. Les matériaux masses thermiques devront être relativement conducteurs de la chaleur. Le béton, par exemple, pourrait être utilisé comme

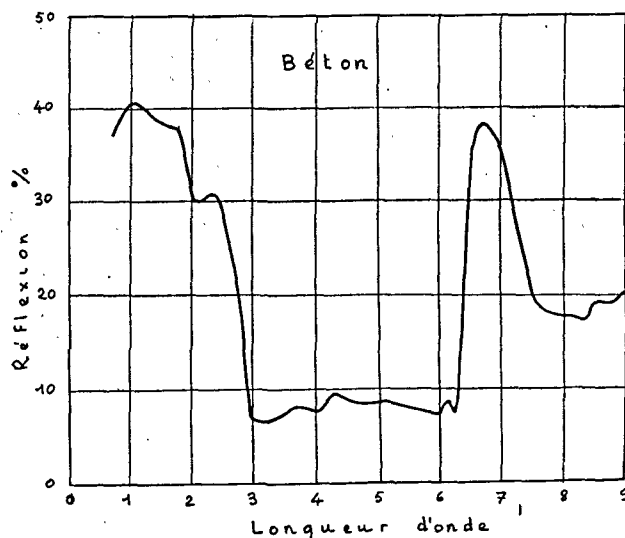


Figure 15

Tableau 2. Énergie solaire reçue au cours d'une journée sur différents plans

Plans	Solstices	Mont-Louis (Pyrénées-Orientales) $\lambda = 42^{\circ} 30' 45''$ (kWh/m <sup>2</sup> )	Colomb-Béchar (Nord du Sahara) $\lambda = 31^{\circ} 47'$ (kWh/m <sup>2</sup> )
Horizontal . . . . .	Été	8,8	8,7
	Hiver	2,3	3,7
Vertical sud . . . . .	Été	1,7	0,6
	Hiver	7	6,9
Vertical est-ouest . . .	Été	4,9	4,5
	Hiver	2,1	2,6

masse thermique interne, alors qu'il est tout à fait déconseillé de l'employer comme écran thermique ou comme paroi, même s'il est revêtu de peintures sélectives, entre l'atmosphère extérieure et celle des habitations.

### Études techniques relatives à la climatisation des habitations

#### LES APPORTS D'ÉNERGIE

Considérons tout d'abord les conditions dans lesquelles peuvent être utilisées les énergies solaire et terrestre.

#### Captage de l'énergie solaire

Les apports d'énergie solaire sur un plan horizontal et sur différents plans verticaux sud, est et ouest sont donnés dans le tableau 2 pour Mont-Louis (sud de la France) et Colomb-Béchar (limite nord du Sahara) pour les solstices d'hiver et d'été. Des valeurs indiquées, on peut déduire :

a) Que les toitures voisines de l'horizontale sont insolées au maximum, en été, alors que les besoins de chauffage sont inexistantes et que, au contraire, on cherche à se protéger des échauffements dus au soleil;

b) Que l'énergie reçue vers la façade verticale sud (identique à Mont-Louis et à Colomb-Béchar) est très élevée en hiver. Elle est donc utilisable pour le chauffage;

c) Que les façades verticales est et ouest, très insolées en été, le sont encore suffisamment en hiver pour une utilisation des calories solaires. Néanmoins, la somme des énergies reçues de l'est et de l'ouest est encore inférieure à l'énergie reçue par la seule façade sud.

d) Pour le chauffage par l'énergie solaire, intéressant particulièrement autour du solstice d'hiver, on peut donc retenir soit la façade verticale sud, soit une toiture à pente sud. L'exploitation d'une façade verticale sud, qui intéresse toute la hauteur du bâtiment, est bien plus facile à réaliser pratiquement que celle d'une toiture. L'air chaud sous une toiture doit être ramené, par ventilation artificielle, vers les parties inférieures du bâtiment, alors que la façade sud peut distribuer ses calories par circulation naturelle dans tous les étages. De plus, les façades verticales à récupération de calories solaires sont protégées des intempéries, alors que la toiture doit présenter une étanchéité et une solidité qui exclut parfois l'emploi de surfaces transparentes.

#### Captage de l'énergie du rayonnement terrestre

Contrairement à ce qui est recherché pour le captage de l'énergie solaire, l'angle solide de rayonnement de surfaces rayonnant sur l'espace doit être maximum. Les toitures présentent, à ce point de vue, un avantage certain. De plus, leur débordement autour du bâtiment peut augmenter les apports de frigories et constituer également les brise-soleil indispensables à la protection de certaines façades, en particulier les façades sud et nord. L'emploi des toitures présente également un autre avantage. Elles représentent la meilleure disposition du captage sélectif de l'air froid, celui-ci descendant par gravité dans les pièces climatisées. L'air chaud produit pendant les périodes d'ensoleillement est, par ailleurs, bloqué sous la toiture, ou éliminé au-dessus dans les meilleures conditions, grâce à sa densité plus faible que celle de l'air des habitations.

#### ÉTUDE SUR LES SURFACES RECEVANT OU ÉMETTANT DE L'ÉNERGIE

Le problème fondamental de la climatisation est de transmettre par un fluide situé au contact des surfaces chauffantes ou refroidissantes le maximum de calories vers les locaux à climatiser. A vrai dire, si l'on utilisait comme fluide un liquide, ce problème serait facilement résolu, mais le prix et la complication des installations rendraient sans intérêt le procédé en question. Le problème se pose pour l'air dont la capacité calorifique est faible et dont il faut utiliser des volumes très importants pour obtenir des effets notables. Les premiers caissons chauffants utilisés à Mont-Louis avaient été construits sans tenir compte de ces considérations, et leur efficacité était notablement plus faible que celle des appareils construits actuellement.

#### Surfaces chauffantes

Examinons tout d'abord le cas du chauffage par le rayonnement solaire, à l'aide d'une surface « corps noir » sans revêtement sélectif, placée derrière un vitrage dans un caisson étanche communiquant avec les pièces à chauffer suivant le schéma de la figure 7. On aura (d'après Fabry, *La Chaleur*, Dunod éditeur) les valeurs suivantes (tableau 3) qui sont relatives à des échanges entre l'air et une surface verticale.

Or, la tôle reçoit du rayonnement solaire une énergie incidente variant de quelques centaines de watts

Tableau 3. Échanges entre l'air et une surface verticale

Température de la tôle	Excès de la température de la tôle chauffée par rapport à l'air ambiant (pris à 17 °C)	Énergie extraite de la tôle par convection naturelle de l'air (en watts par mètre carré)
27. . . . .	+ 10	35,6
37. . . . .	20	85
47. . . . .	30	140
57. . . . .	40	202
67. . . . .	50	266
77. . . . .	60	334
87. . . . .	70	404
97. . . . .	80	478
107. . . . .	90	544
117. . . . .	100	692

à près de 1 kilowatt. On voit que cette tôle, pour évacuer, par convection de l'air qui est à son contact seulement le quart de l'énergie maximum qu'elle peut recevoir, soit 200 à 250 watts/m<sup>2</sup>, devra être portée à une température supérieure de 50 °C à celle de l'air. On observe, en effet, dans les montages simples des températures de tôle voisines de 70 °C, ce qui montre que les pertes par rayonnement et convection d'un dispositif capteur à surface de tôle simple sont considérables. Les conditions sont meilleures si l'air circule plus vite grâce à un effet de cheminée réalisé au-dessus des systèmes capteurs ou par l'emploi d'un ventilateur, mais la véritable amélioration qui a été réalisée récemment à Mont-Louis consiste à augmenter les surfaces d'échange avec l'air en utilisant des tôles rayonnant les unes sur les autres.

On sait que les énergies transmises par rayonnement entre deux surfaces corps noir verticales entre lesquelles il existe une différence de température  $\Delta t$  sont très supérieures à celles qui sont éliminées par un contact surface-air pour le même  $\Delta t$  entre l'air et la surface. On aurait, par exemple, pour une surface froide ou un air récepteur à 17 °C, les valeurs figurant au tableau 4.

Les expériences préliminaires, effectuées à Mont-Louis pour vérifier l'importance du phénomène produit, donnent les résultats suivants :

a) Chauffage avec une seule tôle réceptrice : air entrant : 14°; air sortant : 36°;

b) Chauffage avec quatre tôles parallèles rayonnant les unes sur les autres et ouvertes en haut et en bas : air entrant : 14°; air sortant : 47°.

D'autres expériences avec divers types de récepteurs à grande surface ont donné des gains de tem-

pérature encore un peu plus importants. Les expériences sont poursuivies actuellement à Mont-Louis avec divers types de récepteurs du rayonnement solaire à surfaces sélectives ou non sélectives et des courants d'air à différentes vitesses, afin de définir quantitativement les gains réalisés.

La conclusion qui s'impose, pour le captage et le transport par l'air de l'énergie solaire, est qu'il faut avoir de grandes surfaces d'échange avec l'air transporteur. Les caissons chauffants doivent donc comporter de nombreuses lames réceptrices présentant une surface de contact avec l'air bien plus grande que la surface vitrée par laquelle est admis le rayonnement solaire. Par ailleurs, l'augmentation du rendement dans la climatisation dépend encore, comme nous l'avons souligné, d'autres facteurs qui sont étudiés à Mont-Louis : nombres de vitrages des serres, revêtements sélectifs des surfaces, tenue en service de ces revêtements sélectifs. Certaines augmentations de rendement sont économiquement valables, d'autres sont prohibitives. Il est probable que les doubles vitrages, malgré leurs prix plus élevés que les simples vitrages, seront rentables, alors que les triples vitrages, sauf dans les cas exceptionnels, ne le seraient pas. Le problème se posera aussi de l'efficacité des revêtements sélectifs, notablement plus coûteux que les revêtements « corps noirs » dans les serres pourvues d'un double vitrage et dont les pertes thermiques sont réduites.

#### Surfaces refroidissantes

Nous avons vu précédemment comment pouvaient être constituées ces surfaces (métaux polis revêtus d'oxydes par oxydation anodique, ou surfaces peintes avec certains pigments). De nombreuses études sont effectuées à Mont-Louis sur ces questions. Divers résultats obtenus sont exposés dans le mémoire S/6 signalé plus haut.

Pour le transport dans les pièces à climatiser de la plus grande quantité possible de frigories obtenues par le rayonnement des toitures, il sera, comme pour le chauffage, nécessaire de réaliser des surfaces d'échange suffisamment importantes entre l'air de climatisation et la surface interne de la toiture. Un tel résultat sera obtenu, par exemple, en disposant des surfaces parallèles ou perpendiculaires à celle de la toiture, de manière à réaliser des échanges par rayonnements plus importants que les échanges par convection. Il faut bien souligner que la surface externe de la toiture doit conserver la plus petite valeur possible, ceci pour éviter son réchauffement par l'air externe.

Tableau 4. Échanges par rayonnement et convection (d'après Fabry)

$\Delta t$	Échange par rayonnement watt m <sup>2</sup>	Échange par convection surface air, watt/m <sup>2</sup>
+ 0,5 °C . . . . .	2,80	0,84
1 . . . . .	5,6	20
5 . . . . .	28,5	14,9
10 . . . . .	58,7	35,4
20 . . . . .	123	85

#### Réalisation de maisons climatisées prototypes

Diverses cellules expérimentales d'une vingtaine de mètres cubes chacune sont en cours d'expérimentation pour la climatisation chaude et la climatisation froide. Les résultats obtenus sont déjà suffisamment encourageants pour que l'on envisage la construction de prototypes réellement habitables.

## Résumé

La climatisation d'une maison consiste à réaliser des conditions de température et d'état hygrométrique correspondant à ce que l'on appelle les conditions d'euphorie. Celles-ci sont également tributaires du climat de rayonnement : rayonnement du corps sur l'espace et réception par le corps de rayonnements divers.

La climatisation la plus facile à réaliser consiste à réchauffer un air humide et froid. Elle est beaucoup plus difficile lorsqu'il s'agit de refroidir un air trop chaud et, particulièrement, si cet air est humide.

Les climatisations envisagées se rapportent aux pays à ciel clair : réchauffage d'air sec et froid, refroidissement d'air sec et chaud.

Le refroidissement par évaporation d'eau dans l'air sec provoque bien des diminutions de température, mais ne paraît pas conduire toujours à une amélioration des conditions d'euphorie. Il serait intéressant d'utiliser les effets thermiques dus à la saturation de l'air sans augmenter l'humidité de l'air de climatisation.

### PRINCIPES DE CLIMATISATION DANS LES PAYS A CIEL CLAIR

Dans tout climat, on observe des variations annuelles et journalières de température; ces dernières sont très grandes dans les pays à ciel clair.

Les variations de température de l'air sont dues à des variations de température encore plus grandes des surfaces terrestres (parfois plus de 60°).

Ces variations de température sont dues à deux facteurs antagonistes, le rayonnement solaire et le rayonnement terrestre.

#### *Premier principe de la climatisation naturelle*

Le principe consiste à capter sélectivement les frigories ou les calories produites sur les surfaces terrestres par leur propre rayonnement ou par absorption du rayonnement solaire; on obtiendra ainsi une modification dans le sens « chaud » ou dans le sens « froid » de la température moyenne des habitations.

Le procédé consiste à utiliser un fluide intermédiaire, de préférence gazeux, qui transformera les calories sans l'intervention d'aucun agent moteur, en utilisant les différences de densité entre l'air refroidi ou chauffé et l'air des habitations.

Le dispositif de climatisation naturelle peut être réalisé suivant divers schémas, qui permettent soit le captage des airs chauds produits par le rayonnement solaire, soit le captage des airs froids produits par rayonnement des surfaces terrestres sur l'espace.

Les dispositifs les plus rationnels consistent à placer le système chauffant en dessous des pièces à climatiser et le système refroidissant au-dessus (aménagement des toitures pour refroidir les pièces situées au-dessous).

#### *Deuxième principe de climatisation naturelle*

Il consiste à superposer aux méthodes du premier principe des effets sélectifs dus aux propriétés optiques des surfaces ou des montages utilisés.

Les caractéristiques énergétiques des rayonnements solaire et terrestre sont données.

Il existe des corps réflecteurs pour le rayonnement solaire et « corps noir » pour leur propre rayonnement (*corps sélectifs froids*). On trouve d'autres corps absorbant le rayonnement solaire et émettant peu d'énergie (*corps sélectifs chauds*). Enfin, il existe des corps transparents pour le rayonnement solaire et opaques pour l'infrarouge correspondant au rayonnement terrestre (*corps à effet de serre*).

L'exploitation des propriétés précédentes permet d'augmenter considérablement les intervalles de température des surfaces terrestres vers le bas et vers le haut. Le captage sélectif par l'utilisation du premier principe des calories produites conduira donc à des possibilités de climatisation accrues, soit pour chauffer, soit pour refroidir les maisons.

Des exemples sont donnés de corps sélectifs chauds et de corps sélectifs froids.

#### *Troisième principe de climatisation naturelle*

Le troisième principe consiste à localiser les masses thermiques à l'intérieur des habitations et à diminuer autant que possible les masses thermiques des matériaux servant à l'isolement thermique. On obtient ainsi une stabilisation de la température choisie pour la climatisation.

### ÉTUDES TECHNIQUES RELATIVES A LA CLIMATISATION NATURELLE

#### *Les apports d'énergie*

Le captage de l'énergie solaire est réalisé dans d'excellentes conditions par les parois verticales sud, surtout dans les pays tempérés. Les parois verticales est et ouest sont plus utilisables en hiver dans les zones sud. Au Sahara, pays froid en hiver, les parois verticales est et ouest sont utilisables.

Les toitures présentent les meilleures conditions de captage sélectif de l'énergie du rayonnement terrestre.

#### *Études sur les surfaces recevant ou émettant de l'énergie*

*Surfaces chauffantes.* — Les énergies transmises par rayonnement sont très supérieures à celles transmises par convection. On doit donc, si la convection est seule utilisée, multiplier les surfaces d'échange. Des exemples montrent l'importance de cette observation.

*Surfaces refroidissantes.* — Les surfaces internes des corps rayonnant sur l'espace doivent être très grandes pour permettre un transport suffisant de frigories.

### RÉALISATION DE MAISONS CLIMATISÉES PROTOTYPES

Les auteurs citent diverses réalisations de maisons climatisées. Les résultats sont encourageants.

## PRINCIPLES OF AIR-CONDITIONING IN COUNTRIES WITH A CLEAR SKY

(Translation of the foregoing paper)

F. Tronche and Ch. Henry La Blanchetais \*

To air-condition a house means to modify the climate it naturally presents to make its environment more tolerable, or even agreeable, to human beings. People are particularly sensitive to temperature and relative humidity, and to the possibilities of radiative loss or reception of energy. What are called conditions of comfort for people at rest are conditions under which the temperature of the air and the walls of a dwelling, and the relative humidity, are all within certain limits. Figure 1 gives an idea of these limits for temperature and relative humidity.

The conditions are most agreeable when the relative humidity is between 25 and 60 per cent, and the temperature between 5 and 25°C, since it is obviously difficult for a person at rest to tolerate permanent temperature levels below 10°C, while the physically active person, on the contrary, tolerates temperatures under 20°C much better.

The comfort conditions also depend on the radiation conditions — outdoor life, with possible radiation of the body into space and with possible reception, by the body, of radiation from various surfaces (in the case of cold surfaces or of superheated surfaces), or life at home, where the surfaces exchanging their energy with the body may be hotter or colder than the atmosphere. The movements of the air—breeze, gentle wind, strong wind, or ventilation—are likewise of great importance for both external and internal climates.

The easiest air-conditioning to realize in a residence is the artificial heating of humid, cold air, thereby lowering its relative humidity. For example, referring to figure 1, air saturated with water vapour at 0°C will, if heated to 20°C, have a relative humidity of about 40 per cent, which is an excellent environment for human habitation. On the other hand, air even colder than that, heated to the same temperature, would be dry and irritating. Excessively dry air is often used in centrally heated dwellings, in which the average temperature is in general high. The remedy now applied is to allow a certain quantity of water to evaporate, in contact with heat sources, into the atmosphere, in order to increase the relative humidity to a suitable level. It is more difficult to get air-conditioning when air that is too hot must, on the other hand, be cooled: Sometimes this air must also be desaturated, for its cooling might

cause an approach to the dewpoint curve (figure 1) and make the air disagreeable and even definitely unpleasant.

The problem to be examined here is that of heating or cooling dwellings in countries with a clear sky, for instance, certain mountain regions or hot regions of the Saharan type. Regions of both types are characterized by high insolation, very dry air, and a great daily range of temperature.

In such regions, of the cold type, heating of the air would bring the relative humidity even lower than its initial level. For satisfactory air-conditioning, therefore, water vapour must, as already mentioned, be added to the air in the interior of such dwellings.

On the other hand, in regions with a clear sky, of the hot type, cooling of the air (see figure 1) would most often give a satisfactory relative humidity, although it would still be rather low and conducive to the elimination of excess heat by perspiration. For instance, if air at 15 per cent relative humidity

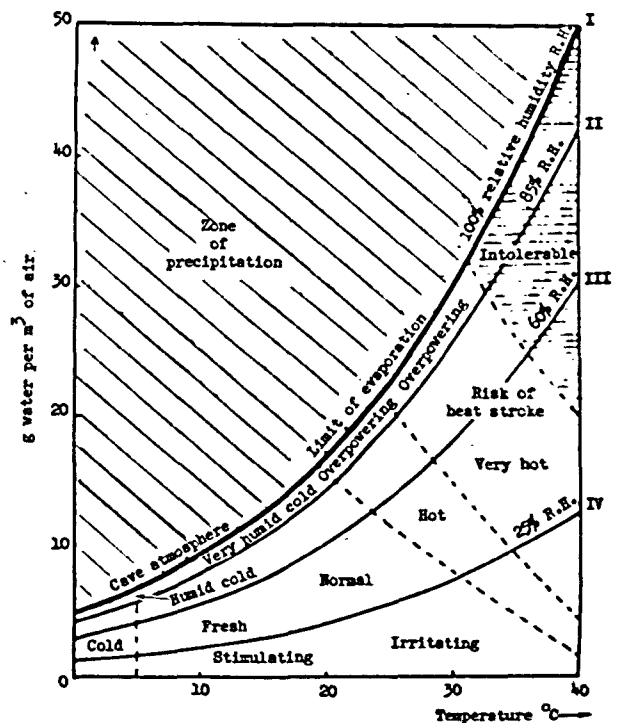


Figure 1

\* Laboratoire de l'énergie solaire du Centre national de la recherche scientifique Mont-Louis, Pyrénées-Orientales, France.

and 35°C were simply cooled to 25°C, its relative humidity would rise to 25 per cent.

The utilization of the initial dryness of the air to cool it by partially saturating it with water vapour has been envisaged. The heat of evaporation of water being about 600 kcal/kg, one might reduce the temperature 6 to 8°C in this way, starting out from a dry, hot air, of Saharan type, say at 35°C and with a relative humidity of 15 per cent. In that case, the relative humidity would rise to 70 per cent. It should be noted that in this case the "gain in comfort" would be slight, for the air so obtained, at 27 to 29°C and with a relative humidity of 70 per cent, would be almost as uncomfortable as the original air. Furthermore, such high relative humidities at such temperatures would promote the development of micro-organisms (moulds). On the other hand, it would be more advantageous to utilize the thermal effects due to the saturation of the air with water vapour, provided that the air so saturated did not directly participate in the air-conditioning. Arrangements for alternating or exchanging the circulation would permit rational utilization of the refrigerant effects of air saturation without sacrificing the advantages of low relative humidity. These effects could naturally be added to those produced by the methods discussed in the present report.

### Principles of natural residential air-conditioning

Annual and daily variations of the temperature and relative humidity are observed in every climate. It is the range of these variations, especially those of the temperature, that permits us to define numerous types of climate. We shall discuss here only the case of regions with a clear sky, characterized by a rather great annual range of temperature, and, above all, by a very great daily range of temperature. In such regions, the relative humidity may sometimes reach high levels, although as a rule it is low.

In regions with a clear sky, the daily range of temperature may exceed 20°C. It is well known that the days in the Sahara are torrid and the nights glacial. But these are only the temperature variations of the air. Since the air gives up most of its heat to terrestrial objects, the range of temperature of these objects must be far greater than that of the air. Experience shows that terrestrial objects do undergo temperature variations that may sometimes exceed that of the free air by as much as 60°C. In figure 2, for instance, curve A'B'C' represents the temperature variation of a blackbody responsible for the temperature variation ABC of the air.

The origin of these variations is due to two mutually antagonistic factors: the solar radiation, and the terrestrial radiation, or loss of infrared energy, from the surfaces into space. We recall that this energy loss represents the difference between the outward infrared radiation of these surfaces and the infrared radiation they receive from the atmosphere. By day, the bodies subjected to solar

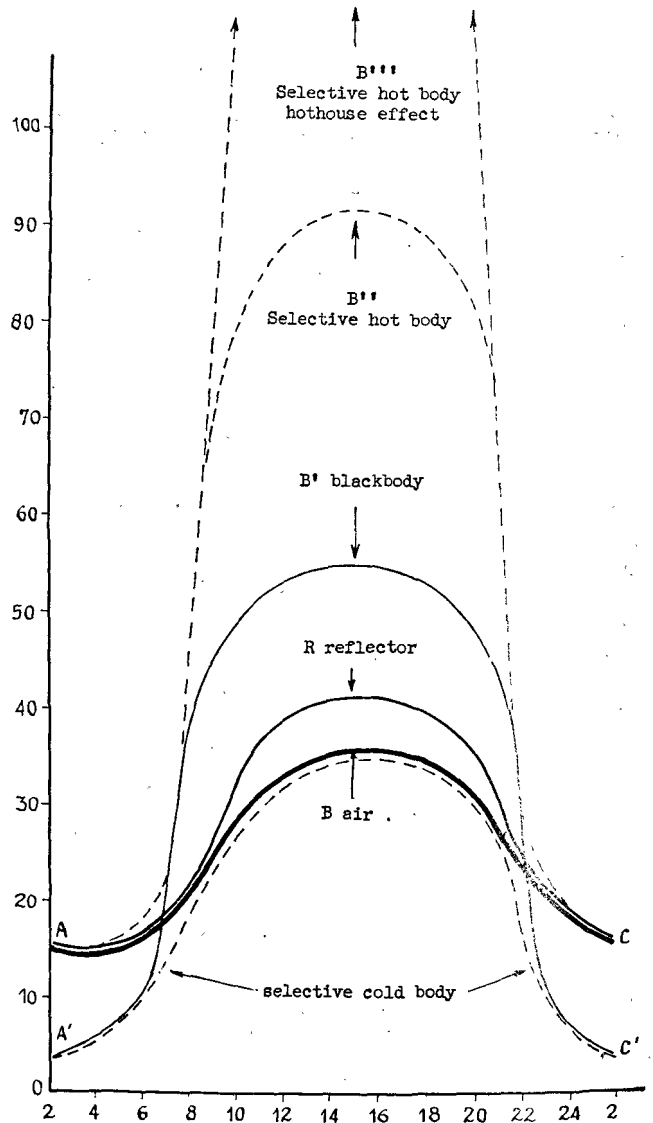


Figure 2

radiation become heated, some of them relatively little, others very much. By night, certain terrestrial surfaces are cooled as a result of their own radiation into space. Some bodies radiate considerably and become much colder than the atmosphere; others radiate little and assume practically the same temperature as the atmosphere.

The general idea of natural air-conditioning consists in the rational exploitation of the variations in the temperature of terrestrial surfaces in order to increase or decrease the mean temperature of a dwelling. In addition, the rational choice of the optical properties of the receiving surfaces permits the further increase of the effects in the desired direction.

#### FIRST PRINCIPLE OF NATURAL AIR-CONDITIONING

The first principle of air-conditioning is the selective capture of heat localized on a terrestrial surface. For instance, an unbroken terrestrial surface of suf-



ficient thermal mass, and behaving like the black-body of figure 2, will assume a resultant temperature representing the "sum" of all the temperatures of the curve A'B'C'. The result will be different, if, in one way or another, the heat influx from outside the system is suppressed during these hours. Day-time insulation during the sunshine hours will lower the mean temperature; night-time insulation will increase it. This is what is, in fact, done in a rough way when dwelling sites are protected from solar radiation or from the cold of the night by appropriately positioned screens.

Let us now examine the problem under the assumption that the surfaces receiving the solar radiation or the surfaces emitting energy into space are of small thermal mass. These surfaces will very rapidly assume the equilibrium temperature. When exposed to the sun, they will heat rapidly, but they will also cool very rapidly, as soon as the solar radiation ceases. The means for drawing the heat selectively (towards heat or towards cold) from the above-mentioned surfaces will involve the use of an intermediate fluid, preferably a gas, to transmit this heat (or cold) into the dwelling. The selective transmission (cold or hot) is accomplished without the intervention of any mechanical agent; simply by the rational utilization of the *motive pressures* created by the differences of density between the hot or cold air produced on contact between the heated or cooled surfaces and the air of the dwelling.

To illustrate the foregoing, let us examine the scheme of figure 3, which represents a room provided with a window-pane behind which is a curtain permitting downward and upward circulation of the air. In this position, the curtain will not interfere with the introduction of heat from outside the system. During the day, the sunlight will fall on it. It will thus be heated, and a column of air warmer than that in the room will be formed. This air will consequently also be less dense than the air in the room. An *upward circulation of air* between the curtain and window will therefore contribute heat to the interior of the room. At night, the window, radiating into space and exchanging heat with the external air, will become cooled and will in turn cool the air coming in contact with it. A *downward current of air* will now become established, the air between curtain and window being still colder than the room, and, consequently, denser than the air in the room. The system will only be slightly selective owing to the protection of the window; the mean temperature of the room will differ rather little from that corresponding to the sum of the thermal contributions of the day and the night.

Now let us imagine that the curtain shuts off completely the base and the sides of the window-pane (single or double), leaving the upper passage free (figure 4). By day, the action of the solar rays, or even the rise in the external temperature, heating the window-pane, will also heat the air between the curtain and the window-pane sufficiently to make it warmer than the air in the room. Being warmer,

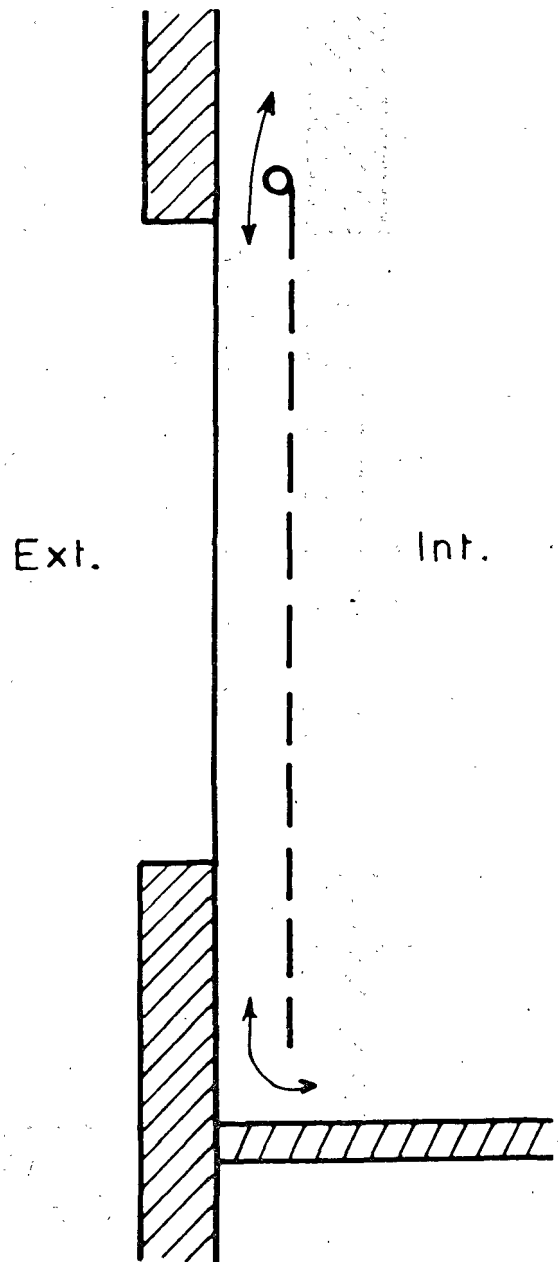


Figure 3

it will be less dense, and will pass into the room, and be replaced by colder air coming from the room. A circulation will be established, limited, in the case of figure 4, by the localized heating of the air in the upper part of the room. To avoid this disadvantage, the curtain theme might be repeated along the glazed wall, thus permitting the flow of the hot air at different levels into the room to be heated (figure 5). The behaviour of the above system at night or in the absence of sunshine shows its selective role. The air between curtain and pane is cooled on contact with the pane, which itself is cooled by outward radiation and heat exchange. This air is colder and consequently heavier than the air in the room, and therefore remains imprisoned in the pocket formed by the curtain and the pane, and will not contribute cold

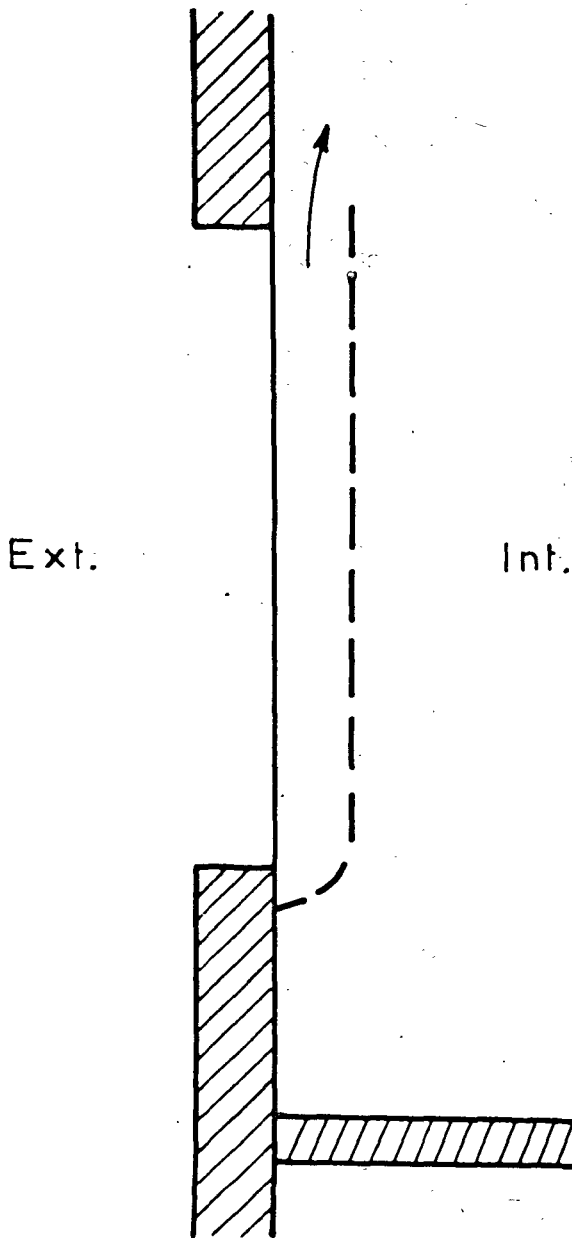


Figure 4

to the interior. By a simple device, involving no energy expenditure whatever, the selective collection of heat will have been successfully accomplished.

If, now, the blocking by the curtain is on top instead of on the bottom (figure 6), the exchanges will be selective in the other sense. The air, heated by the sun, of lower relative density, will remain enclosed in the pocket formed by the curtain and will thus not pass into the room. On the other hand, the cold air, produced at night, being denser, will be able freely to flow along the glazed wall and into the room. A cold selector will have been realized that will cause the room in question to assume a mean temperature lower than the "sum" of the external temperatures. In this latter case, moreover, it will no longer be necessary to use a glazed window

but merely an opaque wall of, for instance, sheet metal.

One may adopt arrangements permitting more complete separation of cold air from hot air (figure 7, heating; figures 8 and 9, cooling). Figure 7 shows a hot-air collection system in which the heating unit is situated entirely underneath the room to be heated. This set-up, in cases where it can be adopted, is thoroughly rational, for the heating system may be in a single piece and be of sufficient height, and the total volume of air in the room to be air-conditioned passes successively into the heating circuit. The hot air produced is localized at the top, and is replaced by cold air entering the circuit B and coming from ground level. The same observations will be made for the scheme of figure 8, which comprises a cooling circuit located above the air-conditioned room. The rational development of this scheme (figure 8)

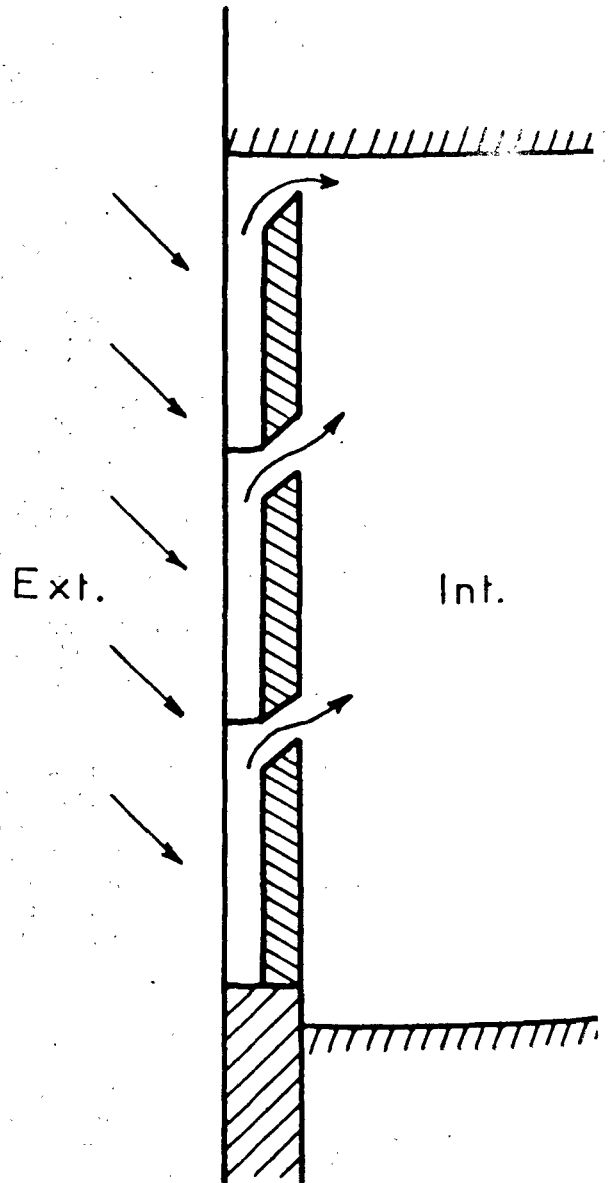


Figure 5

leads to the scheme of figure 9, showing the utilization of the radiation from a selective roofing to cool the room immediately beneath. This is the scheme which will be generalized and improved for the development of cooled houses.

#### SECOND PRINCIPLE OF NATURAL AIR-CONDITIONING

The second principle of natural air-conditioning consists in the superposition, on the methods of selective collection just indicated, of selective effects due to the optical properties of the surfaces and assemblies utilized. Before describing the selective systems we shall term optical, we must first specify certain characteristics of the radiation that act to contribute heat (solar radiation) to the ambient air, or to remove it from the ambient air (terrestrial radiation).

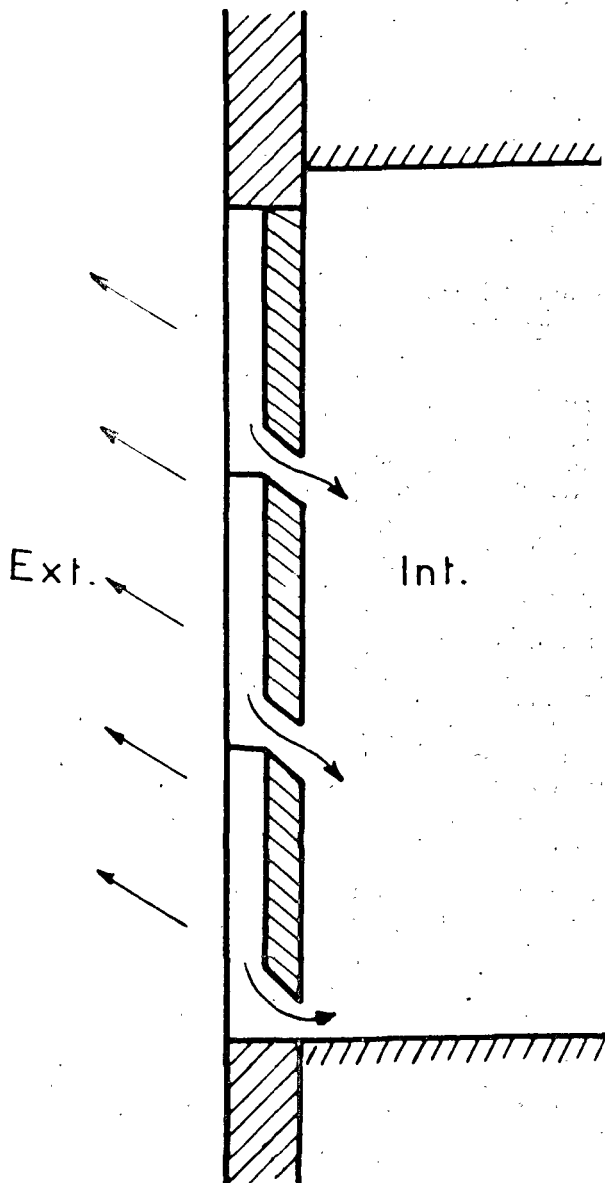


Figure 6

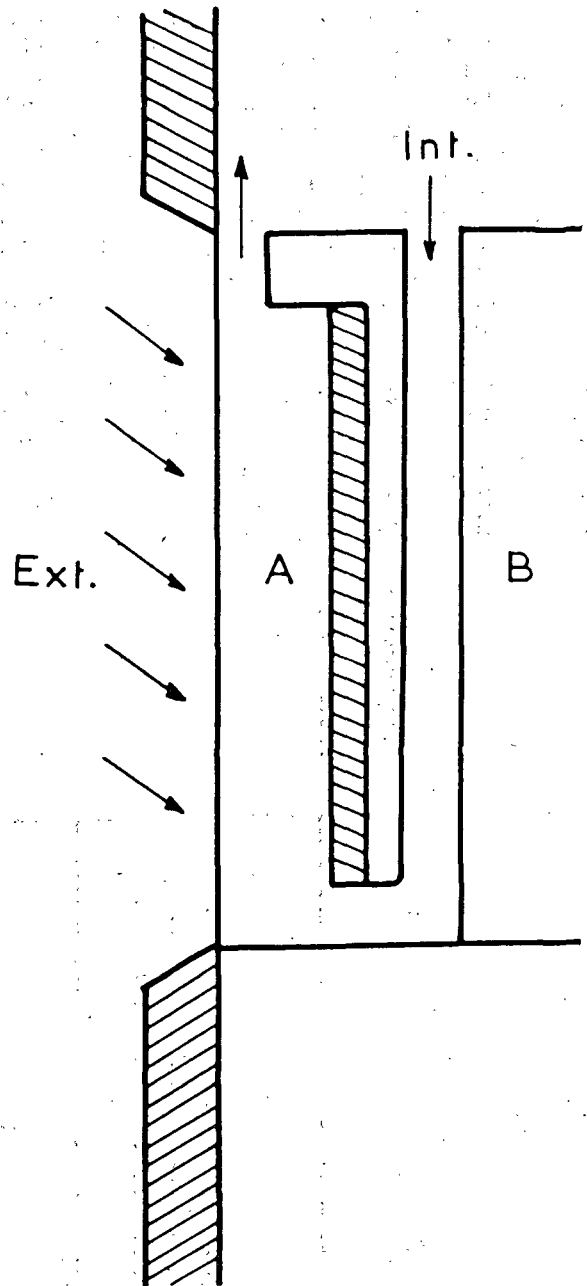


Figure 7

The *solar radiation* is characterized by an energy distribution ranging practically between 0.3 and  $3 \mu$  (see figure 10), that is, from ultraviolet to near infrared. A small percentage of the incoming energy is due to the ultraviolet, a little less than 50 per cent to what we call the visible range, and about 50 per cent to the near infrared, from 0.8 to  $3 \mu$ . The over-all solar radiation incidence exceeds  $1350 \text{ watts/m}^2$  at the level of the stratosphere. It is of the order of one kilowatt per square metre of insolated surface (normal to the direction of the sun) at ground level. This value is currently observed in countries with a clear sky.

The *terrestrial radiation*, or radiation from bodies at or near ordinary temperatures, is far from being

negligible from the point of view of energy. Figure 11 shows that, theoretically, the radiation of a blackbody at  $0^{\circ}\text{C}$  is of the order of  $300\text{ watts/m}^2$ , or a third of the energy received from the sun; at  $100^{\circ}\text{C}$ , the energy radiated by the blackbody would be equal to the energy received from the sun, or  $1\text{ kW/m}^2$ . This equivalence is due to the fact that the terrestrial surfaces radiate their energy, as a rule, over a solid angle (close to  $2\pi$  steradians) much greater than the angle at which they receive the solar radiation, emitted from a source that is very distant from the earth, and has a mean apparent diameter of only  $32'$  of arc. The above values for the theoretical radiation of a blackbody at various temperatures are far from agreement with the observed values for what is called "terrestrial" radiation. The resultant actual energy losses from "blackbody" surfaces, even under the clearest skies, at elevations of the order of  $1\ 000\text{ m}$ , do not,

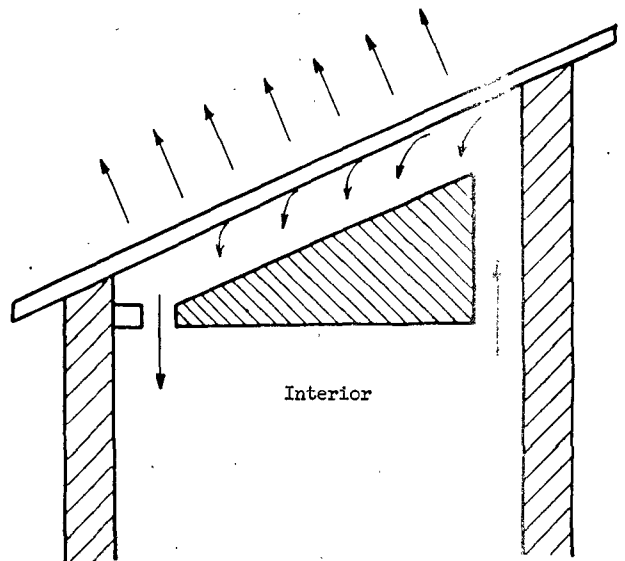


Figure 9

in fact, exceed  $150\text{ watts}$  for emission temperatures close to that of the ambient. This means that the terrestrial atmosphere, even if it is apparently very clear and transparent, emits on to terrestrial surfaces an infrared radiation at least equal to half the theoretical blackbody radiation around  $0^{\circ}\text{C}$  (see curve of figure 11). Another characteristic of the terrestrial radiation is the region of wavelengths in which its energy is emitted. Figure 12 shows spectral energy distribution curves for blackbodies at temperatures of  $259, 273, 293$  and  $313^{\circ}\text{K}$ , or  $-20, 0, 20$  and  $40^{\circ}\text{C}$ . Practically, for these temperature regions, the energy emitted at wavelengths shorter than  $4\ \mu$  is negligible. The maxima of emission are located between  $10$  and  $12\ \mu$ , and then the curve flattens out beyond  $24\ \mu$ . The outward radiation from the terrestrial surfaces is thus rather far in the infrared, and is well separated from the solar radiation.

The principle of selective contribution of heat for the rational exploitation of the optical properties of radiation is based on the following ideas. Besides the blackbody, which is an emitter and acceptor of integral energy for both solar radiation and terrestrial radiation, there exist the following:

- (a) Surfaces that reflect both these radiations (unoxidized aluminium, for instance);
- (b) Surfaces that reflect the solar rays and absorb the terrestrial radiation as would a blackbody;
- (c) Surfaces that absorb the solar radiation and behave like reflectors, that is, they do not emit energy, for the infrared between  $4$  and  $24\ \mu$ ;

(d) Other substances, included among the bodies transparent to solar radiation, are most often opaque for the over-all terrestrial radiation. This opacity may be due to their elevated reflective power, but most often they conduct like blackbodies, that is, like integral absorbers and emitters for the terrestrial radiation ( $4$  to  $24\ \mu$ ).

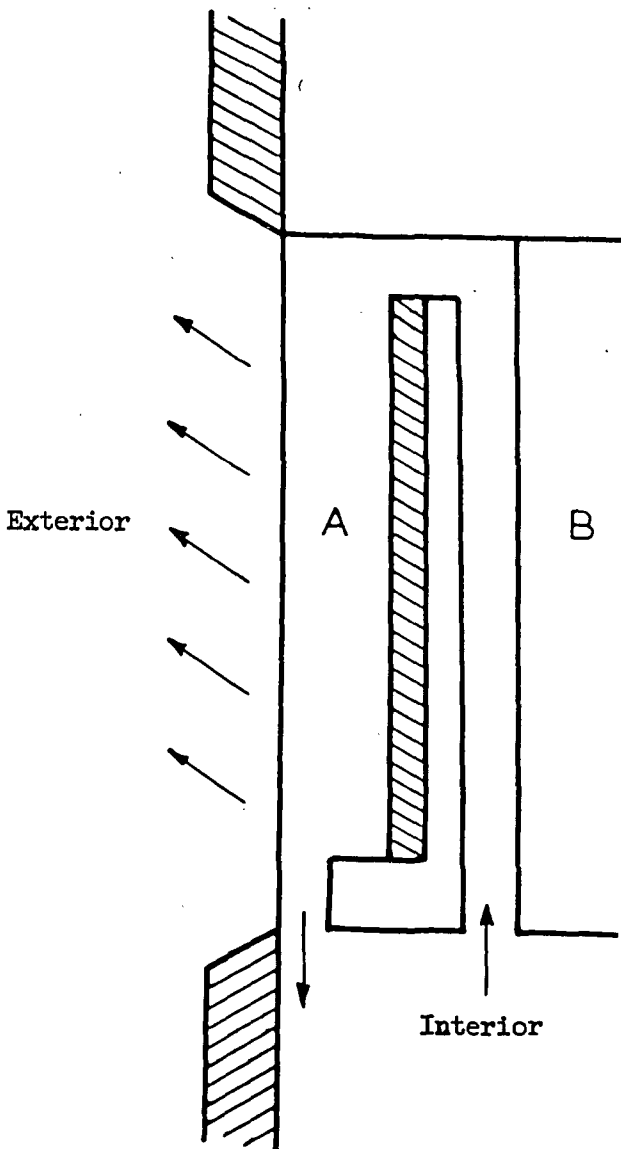


Figure 8

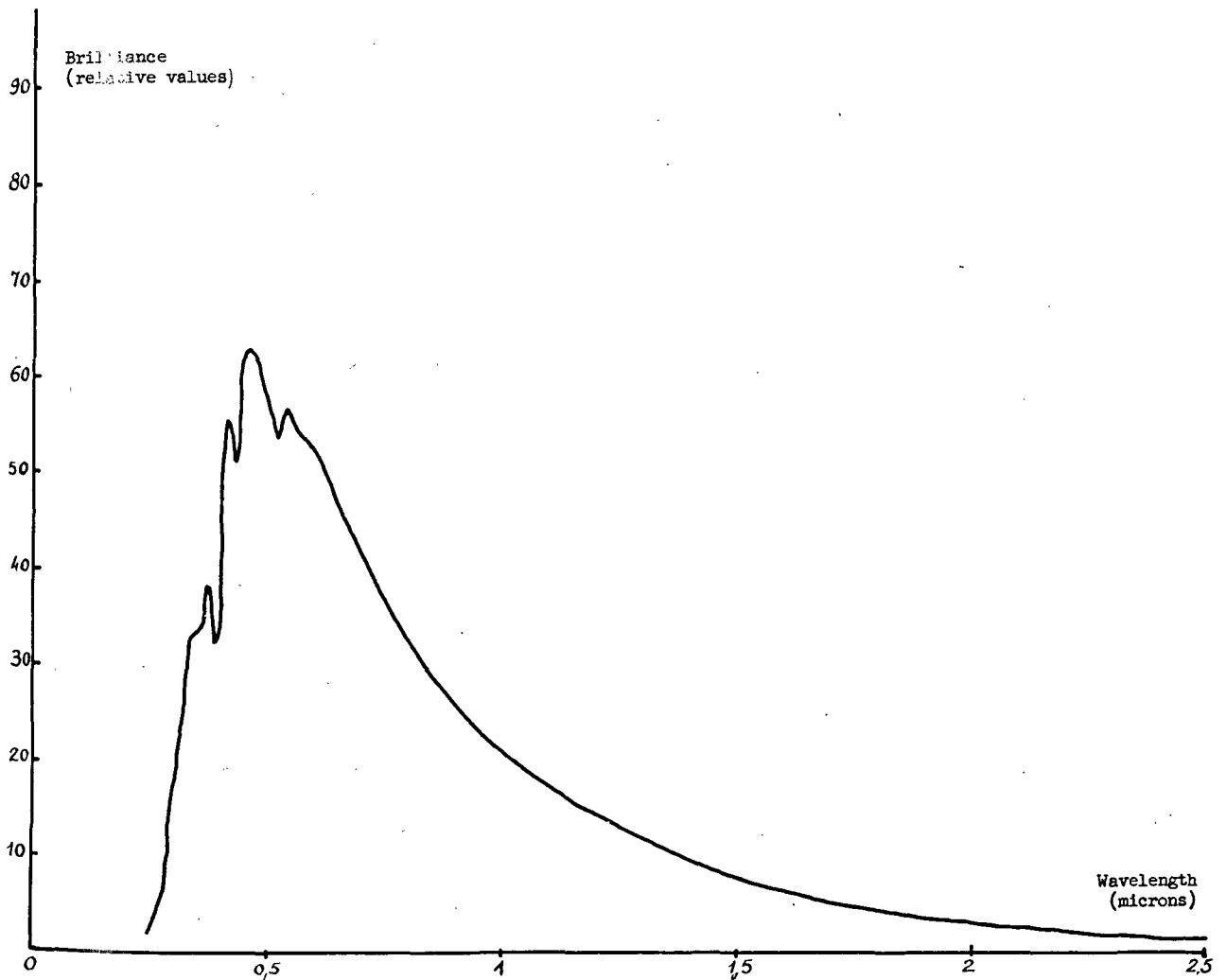


Figure 10

The exploitation of the above properties opens up the following prospects (see figure 2):

(a) A body that reflects in both domains (solar and terrestrial radiation) will have a temperature curve ABC with the maximum R markedly higher than the maximum B for the ambient. The integral reflector retains only very little of the heat from the sun, but it also loses very little by its own radiation, and its temperature rises above that of the air;

(b) An integral blackbody, as we have seen, will give the curve A'B'C';

(c) The bodies that reflect the solar radiation and are blackbodies for the terrestrial radiation will be "selective cold bodies". Experience shows that the daily temperature curves may be represented by A'B'C'; by day, their temperatures remain above, or at the level of, the atmosphere (little energy received from the sun, great emission of energy into space); by night, there is a marked drop in temperature to levels below that of the ambient atmosphere A' and C';

(d) The bodies that absorb the sun and conduct like reflectors, that is, like weak emitters of their

own radiation, will be "selective hot bodies" (figure 2). Under certain conditions, the above values may easily be greatly exceeded, and the temperature may climb well above 100°C;

(e) In discussing heating by solar radiation, we may add the hot-house effect to the above effects. This effect results from the interposition of a transparent surface between the incident solar radiation and the receiving body. The infrared energetic emission (terrestrial) from 4 to 24  $\mu$  is blocked by the glass pane, which becomes heated and re-emits the same amounts of energy into space and towards the receiving body. It has been demonstrated (by Fabry) that the temperature obtained on the heated surface may be equal to what would be given by an incident solar radiation of twice the value. The effect is still further increased by the interposition of several panes. For instance, in the absence of all convection losses, a surface freely radiating into space and subjected to the perpendicular action of a solar radiation of 1 kW/m<sup>2</sup> would reach a temperature of about 90°C. The interposition of a glass pane would permit it to reach 160°C instead. The

interposition of several panes might bring it up to over 200°C. Moreover, the combination of the hot-house effect with that of a "selective hot" coating would yield much higher surface temperatures (several hundred degrees, B", figure 2), and this without any concentration of the incident solar radiation;

(f) We must distinguish here between the *temperature effect* obtained in the heating hot-house structure, and the *energy efficiency* of these hot-house structures. With multiple panes, the energy reaching the collecting surface, whether *blackbody* or *selective surface*, is appreciably diminished by the reflections of the solar radiation on the panes. Less energy is received, but owing to the thermal insulation, there is a very great rise in the wall temperature, even if the wall is not selective. With five panes and an incident solar radiation of 1 kW/m<sup>2</sup>, a temperature of 165 to 190°C has been *experimentally* obtained, depending on the ambient temperature. Such results can be practically developed when the collector systems are required to provide only a little energy per unit of surface. On the other hand, when a receiving wall of large area is to exchange the maximum heat with the air-conditioning air to give the heating hot-house system its maximum output,

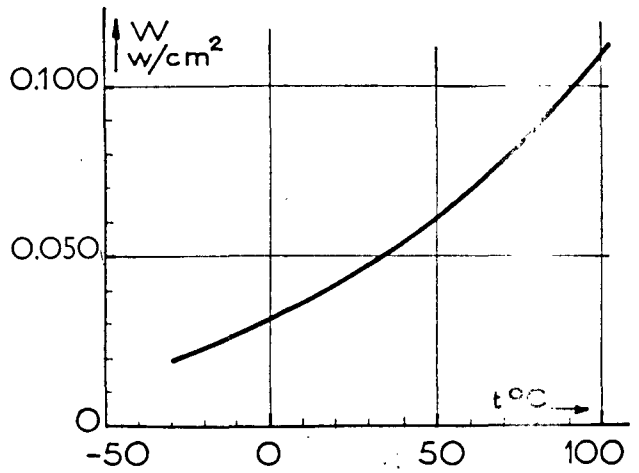


Figure 11

the multiple panes play a much more limited role. Two panes, which yield a wall-temperature gain of several tens of degrees and do not unduly attenuate the incident solar radiation, can certainly be usefully employed; three panes would only give relatively

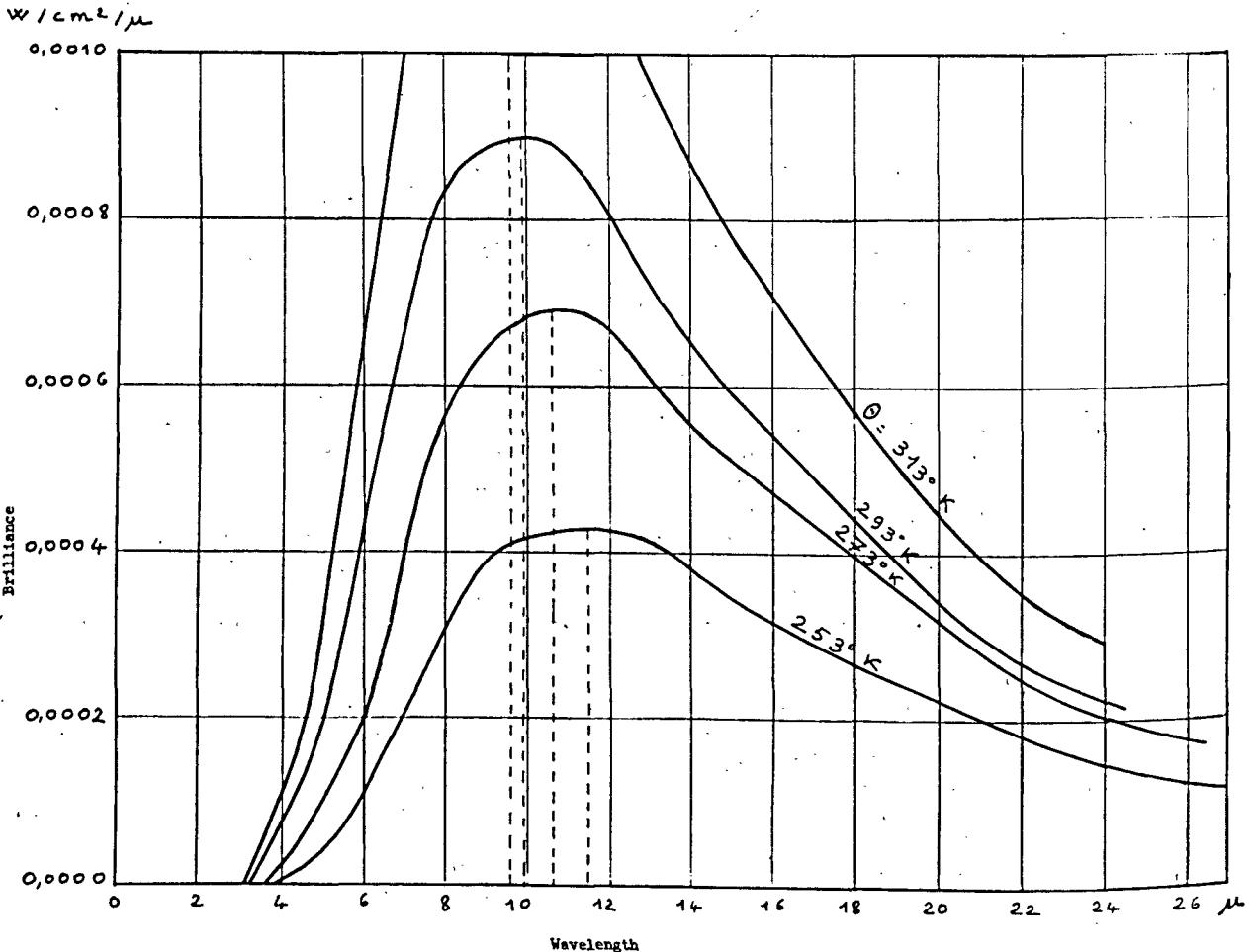


Figure 12

slight gains. We shall not emphasize the hot-house-effect arrangement, which is well known, and which we shall discuss later; on the other hand, certain properties of selective surfaces must be discussed here in greater detail.

#### Selective hot bodies

Selective hot bodies are in general prepared by the formation of very thin deposits on reflecting surfaces of the aluminium type with a good reflection factor at all wavelengths (from 0.3 to 25  $\mu$ ). In this way, the reflection of the solar rays is suppressed or attenuated without modifying the optical properties of the surface in question for infrared from 4 to 24  $\mu$ .<sup>1</sup> The deposits—manganese oxides, copper oxide, or nickel oxide—are formed under various pH and temperature conditions on metal surfaces that have first been lightly oxidized. If the absorbent effect for solar radiation is only partial, it may be palliated by reception of the radiation on surfaces so folded as to produce several reflections of the same incident ray.

#### Selective cold bodies

Selective cold bodies may be classified into two categories, reflecting metals and finely divided pigments.

*Selective effects of reflecting metals coated with transparent surfaces.* The most typical case is that of aluminium and certain of its alloys, for instance Brillalumag (Al with 3 per cent of Mg). This metal, after rolling, is an integral reflector from 0.3 to 24  $\mu$ . Its absorption factor, which is under 0.2 for the solar wavelengths, becomes negligible beyond 4  $\mu$  (figure 13, curve I). A systematic study of oxidation<sup>1</sup>

<sup>1</sup> See Trombe, F., Foëx, M., and Lê Phat Vinh, M., Studies on selective surfaces for air-conditioning, dwellings, *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy*, 1961; vol. 4, agenda item III B, paper S/6.

has shown that aluminium coated with alumina can act as a blackbody for long wavelengths.

*Selective effects of finely divided pigments.* Most oxides, carbonates, and similar compounds are absorbing for the infrared wavelengths corresponding to the terrestrial radiation, and are more or less transparent for solar radiation. The reflection factor

$$\rho = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2$$

of these substances for solar radiation is in general low. For zinc oxide, the refractive index  $n = 2.02$ , and its reflection factor (visible light) is 11 per cent; for alumina,  $n = 1.76$ , and  $\rho$  visible = 7.5 per cent; for titanium oxide,  $\text{TiO}_2$  (*Anatase*),  $n = 2.55$  and  $\rho = 19$  per cent; the rutile variety of  $\text{TiO}_2$  gives an average value of  $n = 2.8$  and  $\rho = 20$  per cent. When these substances are reduced to exceedingly fine powder, the number of reflections is multiplied without excessive increase of absorption for solar radiation. In this way, one may prepare a product with strong diffuse reflection for solar radiation accompanied at the same time by a high absorption factor or emission factor in the far infrared. Table 1 (taken from Lecomte, published by Gauthièrs-Villars, 1949) illustrates what has just been said. The behaviour of a selective cold paint with a zinc oxide base will likewise be seen from figure 14. The fineness of the crystalline grains (which has not been determined for the values indicated nor for figure 14) is probably what defines the value of the reflection factor. We shall see later the practical results that have been obtained with paints loaded with selective pigments. The curve of figure 14 is nevertheless now comparable with that of concrete (figure 15). It will be seen that the surface of concrete is at the same time far more absorbing for solar radiation and more reflecting in the longwave region than zinc oxide. It therefore absorbs more

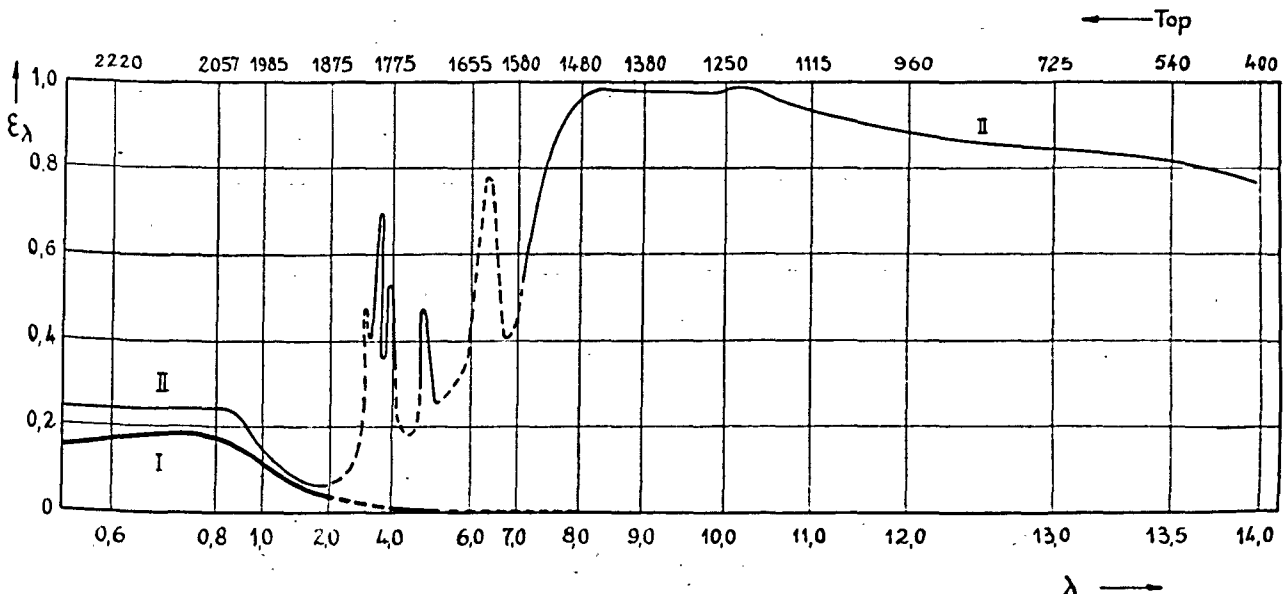


Figure 13

Table 1. Reflectivity of pigments (after Lecomte)

Nature of body	Reflectivity (per cent) *				
	0.60	0.95	4.4	8.8	21
Cobalt oxide (Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ) . . . . .		2.5 to 4	13.9	11.8 to 14.6	5.9
Copper oxide (CuO) . . . . .		25.3	15.2	—	4.4
Chromium oxide (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) . . . . .		44.6	32.0	5.0	8.2
Lead oxide (PbO) . . . . .		—	50.6	25.6	9.5
Ferrous oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) . . . . .		41.0	29.9	3.7	9.1
Yttrium oxide (Yt <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) . . . . .		—	31.4	11.1	10.0
Lead chromate (PbCrO <sub>4</sub> ) . . . . .		—	41.2	4.74	7.4
Aluminium oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) . . . . .	84.1	87.7	20.8	1.34 to 1.64	6.5
Thorium oxide (ThO <sub>2</sub> ) . . . . .		—	46.9	7.11	10.0
Zinc oxide (ZnO) . . . . .	82.2	86.4	8.4	3.2 to 2.1	5.1
Magnesium oxide (MgO) . . . . .		—	16.0	2.5	9.1
Calcium oxide (CaO) . . . . .		—	22.3	3.6	6.2
Zirconium oxide (ZrO <sub>2</sub> ) . . . . .		84.1	23.2	5.1	5.4
Lead carbonate (PbCO <sub>3</sub> ) . . . . .	86.8 to 89.0	90.8 to 94.5	29.2	8.3 to 13.2	6.9
Magnesium carbonate (MgCO <sub>3</sub> ) . . . . .		89.4	10.8	4.1	8.8

energy than zinc oxide and loses less; owing to this fact, it becomes far more heated by day, under the action of the solar radiation, and cools off more slowly by night. To these disadvantages, one must also add that of the rather high thermal conductivity of concrete; this has the effect of bringing into play during the day masses of very large thermal capacity, which then create a disagreeable internal climate for most of the night.

THIRD PRINCIPLE OF NATURAL AIR-CONDITIONING

The third principle of natural air-conditioning consists in the greatest possible stabilization of the temperature obtained from the thermal contributions realized by the exploitation of the first two principles. If the residences are made thermally leakproof, as perfectly as possible with the minimum of thermal mass, the temperature that is most favourable for the dwelling will be stabilized by the introduction

of thermal masses into the interior of the air-conditioned rooms themselves. The material for the thermal masses must be relatively good conductors of heat. Concrete, for instance, might be used as an internal thermal mass, while it is highly inadvisable to use it as a thermal screen or as a wall, even if it is coated with selective paints, between the outside atmosphere and the atmosphere of the dwelling.

Technical studies on residential air-conditioning

ENERGY INPUTS

Let us first consider the conditions under which the solar and terrestrial energy can be utilized.

Collection of solar energy

The incidence of solar energy on a horizontal plane, and on various southern, eastern and western vertical planes, are given in table 2 for Mont-Louis

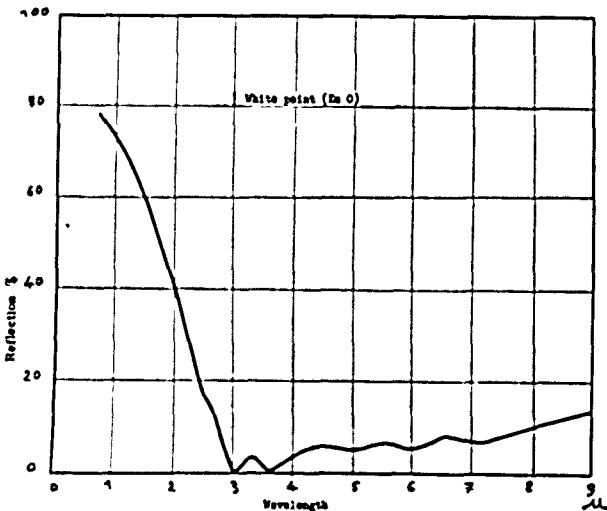


Figure 14

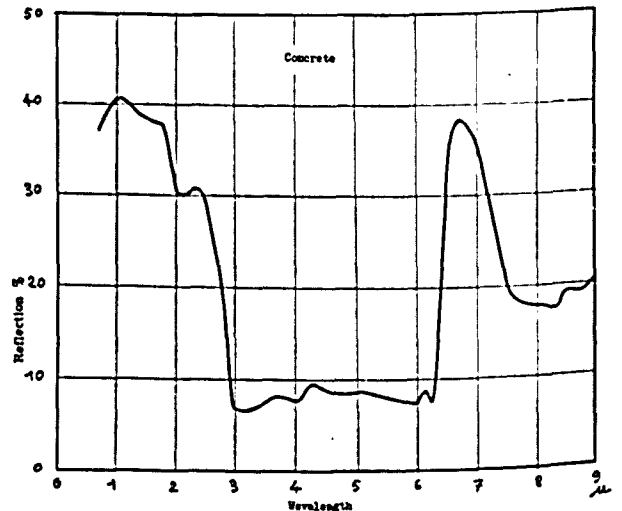


Figure 15



Table 2. Solar energy received per day on various planes

Plane	Solstice	Mont-Louis (Pyrénées-Orientales)	Colomb-Béchar (Northern Sahara)
		$\lambda = 42^{\circ}30'45''$ (kWh/m <sup>2</sup> )	$\lambda = 31^{\circ}47'$ (kWh/m <sup>2</sup> )
Horizontal . . . . .	summer	8.8	8.7
	winter	2.3	3.7
Vertical southern . . . . .	summer	1.7	0.6
	winter	7	6.9
Vertical eastern and western . . . . .	summer	4.9	4.6
	winter	2.1	2.6

(southern France) and Colomb-Béchar (northern edge of the Sahara) for the winter and summer solstices. From these values, the following may be concluded:

(a) Almost horizontal roofs receive maximum insolation in summer, when there is no need at all for heating, and when, on the contrary, one tries to gain protection from excessive heat due to the sun;

(b) The energy received on the southern vertical wall (which is the same at Mont-Louis and Colomb-Béchar) is very great in winter. It can therefore be utilized for heating;

(c) The eastern and western vertical walls, which are very greatly insolated in summer, are still sufficiently insolated in winter for utilization of the solar heat. Nevertheless, the sum of the energy received from the east and the west is still less than the energy received by the southern wall alone.

(d) For heating by solar energy, which is of particular interest around the winter solstice, either the southern vertical wall or a roof with a southern slope may be used. The exploitation of a southern vertical wall, involving the entire height of the building, is much easier to realize practically than that of a roof. The hot air under the roof must be brought by artificial ventilation towards the lower parts of the building, while the southern wall can distribute its heat by natural circulation in all floors. Moreover, the vertical walls to collect the solar heat are protected against bad weather, while the roof must be of a tightness and solidity that sometimes precludes the use of transparent surfaces.

#### Collection of the energy of terrestrial radiation

Contrary to the objective for collection of solar energy, the solid angle of radiation of the surfaces into space should be maximum. From this point of view, roofs have a certain advantage. Moreover, their overflow around the building may increase the withdrawal of heat and likewise form the sun-shields that are essential for the protection of certain façades, especially those on the south and north. The use of roofs also has another advantage. They are the best arrangement for selective collection of cold air, which descends by gravity into the air-conditioned rooms. The hot air formed during the periods of insolation is immobilized under the roof, or, under

optimum conditions, eliminated at the top, since it is less dense than the air in the dwelling.

#### STUDY OF SURFACES RECEIVING OR EMITTING ENERGY

The fundamental problem of air conditioning is to transmit, by a fluid located at the contact of the heating or cooling surfaces, the maximum heat towards the rooms to be air-conditioned. As a matter of fact, if a liquid were used as the working fluid, this problem would be easily solved, but the cost and the complexity of such installations would rob this method of all interest. The problem arises for air, which has a very low heat capacity and which must be used in very large volume to obtain an appreciable effect. The first heater chests used at Mont-Louis were designed without taking these considerations into account, and their efficiency was substantially less than that of the devices now being built.

#### Heating surfaces

Let us first examine the case of heating by solar radiation by the aid of a "blackbody" surface without a selective coating, placed behind a glass pane in an air-tight compartment communicating with the rooms to be heated according to the scheme of figure 7. Table 3 gives the following values in this case (according to Fabry, *Heat*, published by Dunod) for the heat exchange between the air and the vertical surface.

Table 3. Heat exchange between air and vertical surface

Temperature of the metal sheet	Excess of the temperature of the metal sheet over the atmospheric temperature (assumed to be 17°C)	Energy extracted from the metal sheet by natural convection of the air (in watts per square metre)
27. . . . .	+10	35.6
37. . . . .	20	85
47. . . . .	30	140
57. . . . .	40	202
67. . . . .	50	266
77. . . . .	60	334
87. . . . .	70	404
97. . . . .	80	478
107. . . . .	90	544
117. . . . .	100	692

But the incident energy from solar radiation received by the metal sheet ranges from several hundred watts to about one kW. It will be seen that this metal sheet, in order to lose, by convection through the air in contact with it, only one-fourth of the maximum energy it can receive, that is, 200 to 250 watt/m<sup>2</sup>, would have to be 50°C hotter than the air. In simple designs, indeed, sheet metal temperatures close to 70°C are noted, which shows that the losses by radiation and convection of a collector system with a single sheet metal surface are substantial. The conditions are better if the circulation of the air is more rapid as a result of the chimney effect above the collector systems, or by using a fan, but the real improvement, which has recently been accomplished at Mont-Louis, consists in increasing the exchange surfaces with the air by the use of metal sheets radiating on each other.

It is well known that the energy transmitted by radiation between two vertical blackbody surfaces, differing in temperature by  $\Delta t$ , will be very much greater than the energy removed by a surface-air contact at the same  $\Delta t$  between air and surface. For example, we shall have the values given in table 4 for a cold surface or a receiving air at 17°C.

Preliminary experiments performed at Mont-Louis to verify the importance of this phenomenon give the following results:

(a) Heating with a single receiving metal sheet: entering air: 14°C; leaving air: 36°C;

(b) Heating with four parallel metal sheets, radiating on each other and open at the top and bottom: entering air: 14°C; leaving air: 47°C.

Other experiments with various types of large-area receivers have yielded somewhat greater temperature gains. Experiments are now in progress at Mont-Louis with various types of solar-radiation receivers with selective or non-selective surfaces, and with air currents at various speeds, in order to define quantitatively the gains realized.

Table 4. Radiative and convection exchanges (after Fabry)

$\Delta t$	Radiative exchange (watt/m <sup>2</sup> )	Convection exchange, surface-air (watt/m <sup>2</sup> )
+0.5°C . . . . .	2.80	0.84
1 . . . . .	5.6	20
5 . . . . .	28.5	14.9
10 . . . . .	58.7	35.4
20 . . . . .	123	85

The necessary conclusion, for the collection and transmission of solar energy by means of air, is that one must have large exchange surfaces with the heat-transfer air. Heating chests should thus comprise numerous receptor sheets, presenting a contact surface to the air very considerably greater than the glazed surface through which the solar radiation is admitted. Moreover, the increase in efficiency of air conditioning also depends, as we have already emphasized, on other factors, which are now under study at Mont-Louis: the number of glass panes in the hot-house structures, selective coatings of the surfaces, and the maintenance of these selective coatings. Certain increases in efficiency are economically valid, while others involve a prohibitive cost. Double panes, in spite of the fact that their cost is higher than single panes, will probably still be economic; triple panes will be economic only in exceptional cases. The problem of the efficiency of selective surfaces will also arise, for such surfaces are substantially more expensive than the "blackbody" coatings in hot-houses provided with a double pane, where the thermal losses are lower.

#### Cooling surfaces

We have already seen how these surfaces may be prepared — polished metals coated with oxides by anodic oxidation, or surfaces painted with certain pigments. Many studies of these questions have been performed at Mont-Louis. Various results of these studies are given in Paper S/6 mentioned above.

In order to transport into the air-conditioned rooms the largest possible amount of cold produced by the radiation from the roofs, it will be necessary, as in the case of heating, to have sufficiently large heat-exchange surfaces between the conditioning air and the inside surface of the roof. Such a result will be obtained if, for instance, we dispose of surfaces parallel or perpendicular to that of the roof, so that the radiative heat exchange shall be greater than the convective heat exchange. It must be particularly emphasized that the *external* surface of the roof must be as small as possible to avoid its heating by the external air.

#### Realization of prototype air-conditioned houses

Various experimental cells, each of about twenty cubic metres, are now undergoing tests for heating and cooling air-conditioning. The results are already sufficiently encouraging to make it possible to envisage the construction of prototypes that are actually habitable.

#### Summary

Air-conditioning means to establish conditions of temperature and relative humidity corresponding to what are called the conditions of comfort. The latter likewise depend on the radiation conditions:

radiation of the body into space and radiation of various kinds received by the body.

The type of air-conditioning that is easiest to realize consists in heating humid, cold air. It is far

more difficult when air that is too hot must be cooled, especially if this air is also humid.

The types of air-conditioning here considered — heating dry cold air, cooling dry hot air — relate to regions with a clear sky.

Cooling by evaporation of water in dry air does decrease the temperature but does not appear always to improve the conditions of comfort. It would be of interest to utilize the thermal effects due to air saturation without increasing the humidity of the air-conditioned air.

#### PRINCIPLES OF AIR-CONDITIONING IN REGIONS WITH A CLEAR SKY

Annual and diurnal variations of temperature are observed in all climates. The diurnal variations are very great in regions with a clear sky.

The variations of atmospheric temperature are due to still greater variations of temperature of the earth's surface (amounting sometimes to over 60°C).

These temperature variations are due to two antagonistic factors, solar radiation and terrestrial radiation.

##### *First principle of natural air-conditioning*

This principle consists in the selective collection of *frigories*, or calories produced on terrestrial surfaces by their own outward radiation or by the absorption of solar radiation. In this way, the mean temperature of a dwelling is modified in the "warm" or "cold" direction, as the case may be.

The method consists in the utilization of an intermediate fluid, preferably, a gas, to transfer the heat without the intervention of any moving body, by utilizing the density-differences between the cooled or heated air and the air of the dwelling in question.

The natural air-conditioning set-up may be realized by various schemes which permit either the collection of the hot air produced by the solar radiation or of the cold air produced by radiation from terrestrial surfaces into space.

The most rational arrangements place the heating system below the rooms to be air-conditioned and the cooling system above them (arranging the roofs so as to cool the rooms located below them).

##### *Second principle of natural air conditioning*

This principle consists in superposing on the methods of the first principle the selective effects due to the optical properties of the surfaces or assemblies utilized.

The energy characteristics of solar and terrestrial radiation are given.

There exist bodies that are reflecting for solar radiation and are "blackbodies" for their own radiation (*selective cold bodies*). There also exist bodies that absorb the solar radiation and themselves emit little energy (*selective hot bodies*). Finally, there exist bodies transparent to the solar radiation and opaque to the infrared corresponding to the terrestrial radiation (*hot-house-effect bodies*).

The exploitation of the above properties permits a considerable upward and downward extension of the temperature limits of terrestrial surfaces. The selective capture, by the use of the first principle, of the heat produced, will thus lead to increased possibilities for air conditioning, for either space heating or space cooling.

The authors give examples of selective hot bodies and selective cold bodies.

##### *Third principle of natural air conditioning*

The third principle consists in localizing the thermal masses in the interior of the dwellings, and in diminishing, as much as possible, the thermal masses of the materials used for the thermal insulation. In this way, the temperature selected for the air conditioning may be stabilized.

#### TECHNICAL STUDIES ON NATURAL AIR CONDITIONING

##### *The inflows of energy*

Capture of solar energy is effected under excellent conditions by vertical southern walls, especially in temperate zones. Eastern and western vertical walls are of greater utility in winter in the southern zones. In the Sahara, a cold region in the winter, eastern and western vertical walls can be utilized.

Roofs offer the best conditions for the selective capture of the energy of terrestrial radiation.

##### *Studies on surfaces receiving or emitting energy*

*Heating surfaces.* The energy radiatively transferred is very much greater than the energy convectively transferred. If convection is the only means utilized, therefore, the heat exchange surfaces must be multiplied. The authors cite examples to show the importance of this observation.

*Cooling surfaces.* The *internal* surfaces of bodies radiating into space should be very great to permit a sufficient transfer of *frigories*.

#### REALIZATION OF PROTOTYPE AIR-CONDITIONED HOUSES

The authors mention various realizations of such houses. The results are encouraging.

*Agenda item III.E*

**USE OF SOLAR ENERGY FOR PRODUCTION OF FRESH WATER**

*Point III.E de l'ordre du jour*

**EMPLOI DE L'ÉNERGIE SOLAIRE  
POUR LA PRODUCTION D'EAU DOUCE**

*Chairman — Président*

**Julio G. HIRSCHMANN**

*Rapporteur*

**Cyril GOMELLA**

## EMPLOI DE L'ÉNERGIE SOLAIRE POUR LA PRODUCTION D'EAU DOUCE

*Cyril Gemella \**

L'énergie solaire est une énergie rayonnante de courte longueur d'onde dont le maximum d'intensité se situe à 0,47 microns. Aucun des procédés de dessalement dont on peut sérieusement envisager l'emploi, actuellement ou à moyen terme, n'utilise directement l'énergie rayonnante.

L'utilisation de l'énergie solaire pour le dessalement implique par conséquent sa transformation préalable en énergie thermique, mécanique ou électrique, c'est-à-dire en une des trois formes utilisées dans les procédés de dessalement faisant appel directement à l'énergie. Ces procédés sont les distillateurs thermiques (simples, à effets multiples, à évaporation instantanée ou « flash »), les distillateurs à compression de vapeur, la séparation par congélation, et l'électrodialyse.

La transformation directe de l'énergie rayonnante en énergie mécanique n'est pas concevable pratiquement dans l'état de choses actuel; la production d'énergie mécanique à partir de l'énergie solaire doit par conséquent passer par un stade préliminaire de conversion, soit en énergie électrique, soit en énergie thermique.

La conversion directe de l'énergie rayonnante en énergie électrique a fait des progrès considérables, et des rendements de conversion de 10 à 20 p. 100 peuvent être considérés comme acquis ou comme à la veille d'être obtenus.

Ces rendements relativement élevés supposent l'emploi de substances très pures, et le prix de ces convertisseurs est tel (1 000 NF/Watt) qu'ils ne peuvent trouver des applications que dans des domaines très particuliers qui n'englobent pas celui du dessalement des eaux.

L'énergie électrique peut être obtenue en passant par le stade de la conversion thermique. Les thermopiles à semi-conducteur ont été très sérieusement perfectionnées ces dernières années. Mais le prix élevé de l'ensemble de l'appareillage ne permet pas d'en envisager le couplage avec un appareil de dessalement. Certains spécialistes pensent cependant qu'aux températures moyennes obtenues avec des collecteurs plats sélectifs sans concentrateurs, les thermopiles pourront d'ici dix ans avoir un rendement suffisant pour que le prix de revient de l'énergie électrique obtenue soit acceptable dans des régions non industrielles.

Si cette prédiction se vérifie, on peut espérer que l'on verra la mise en service de combinaisons du

genre collecteurs plats sélectifs, thermocouples produisant de l'énergie électrique, ou appareils de dessalement par électrodialyse.

L'énergie électrique peut évidemment être produite par une machine thermique. Les schémas de dessalement impliquant une énergie électrique produite de cette façon ont été jusqu'à présent généralement rejetés par les spécialistes. Il faut cependant noter que Baum (S/119) le considère comme présentant suffisamment de possibilité pour que son étude soit entreprise dans les détails, et ceci plus particulièrement dans le cas du dessalement des eaux saumâtres (salure inférieure à 10 000 ppm).

La transformation de l'énergie rayonnante en énergie thermique peut se faire au niveau même du collecteur d'énergie dont il existe deux types principaux : les collecteurs plats et les collecteurs à concentration.

Un progrès considérable a été obtenu par l'utilisation de nouveaux matériaux et par l'emploi de surfaces transparentes ou absorbantes à faible pouvoir émissif. En ce moment même, des recherches intéressantes sont en cours dans de nombreux pays pour améliorer la qualité de ces nouveaux matériaux et surtout pour abaisser le prix de revient des surfaces sélectives à faible pouvoir émissif.

Avec des collecteurs plats ordinaires, on obtient des températures de conversion de 100 °C. Avec des concentrateurs sommaires et un collecteur sélectif, on atteint aisément 250 à 300 °C. L'obtention de températures plus élevées exige l'emploi de dispositifs optiques plus onéreux et délicats.

L'obtention de hautes températures n'est pas le seul critère de qualité qu'il faut appliquer aux convertisseurs thermiques. L'émissivité, c'est-à-dire le pouvoir de rerayonner l'énergie reçue, augmente très vite avec la température, et un collecteur plat à température élevée réémet vers l'extérieur une grande partie de l'énergie qu'il vient d'absorber et qui ne peut donc être réellement utilisée. On peut donc parler du rendement d'absorption du collecteur, qui est le rapport de l'énergie réellement disponible à l'énergie solaire incidente.

Dans le cas d'un collecteur plat ordinaire (surface noire recouverte d'un vitrage mince), le rendement est de l'ordre de 80 à 30 °C. Il tombe à 30 p. 100 aux environs de 90 °C. L'élévation du niveau de température de conversion qui facilite l'emploi ultérieur de l'énergie thermique et améliore le rendement thermodynamique des opérations d'utilisation subséquentes conduit pas ailleurs à une perte importante

\* Directeur de la Société d'études pour le traitement et l'utilisation des eaux, Alger.

de l'énergie incidente, et ceci au niveau même du collecteur convertisseur.

Les collecteurs sélectifs apportent un remède efficace en réduisant fortement les pertes par rerayonnement aux températures élevées.

Pour un collecteur plat sélectif analogue au précédent, le rendement sera également de l'ordre de 80 p. 100 à 30 °C, mais de surcroît restera au voisinage de 65 p. 100 à 90 °C contre 30 p. 100 pour le collecteur ordinaire.

Il résulte de ce qui précède que le dessalement des eaux par énergie solaire doit être précédé d'une conversion préalable de l'énergie rayonnante en énergie thermique. Les procédés ayant conduit, dans le passé, à des réalisations pratiques ont utilisé directement cette énergie thermique pour obtenir le dessalement, c'est-à-dire sont à ranger dans les procédés de « distillation ».

De même, la plupart des projets envisagés pour l'avenir sont également des distillations, en dehors de quelques cas particuliers, comme celui de l'hypothèse de Baum déjà citée (S/119).

La faible densité de l'énergie solaire réellement disponible à la surface de la terre (800 Watts/m<sup>2</sup> en pointe à 6 kWh/m<sup>2</sup>/jour) et les contradictions qui existent entre les paramètres (haut rendement de captage, température élevée de captage, prix unitaire et simplicité des collecteurs, facilité et rendement de l'utilisation ultérieure de l'énergie thermique disponible) expliquent pourquoi la conception et la réalisation du collecteur font partie des difficultés principales rencontrées sur le plan pratique dans l'emploi de l'énergie solaire au dessalement des eaux. Ce problème n'est pas propre au domaine qui intéresse le présent rapport, et si des progrès importants se trouvent réalisés dans le mode de collecte ou de conversion de l'énergie solaire à la suite des travaux effectués dans un des nombreux domaines d'intérêt présentés par l'énergie solaire en général, ces progrès peuvent complètement modifier la situation actuelle des choses.

### Les différents stades de la distillation solaire

Si l'on fait abstraction de quelques anciennes recherches qui relèvent de la curiosité intellectuelle plutôt que d'une préoccupation réelle par le problème, on peut distinguer les stades ci-après.

L'année 1883 a vu la réalisation d'emblée par Harding au Chili d'un distillateur du type serre de grandes dimensions (23 T/jour pour 4 800 m<sup>2</sup>).

Vers 1925-1928, on note un brusque regain d'intérêt pour la distillation solaire. La réalisation pratique de distillateurs solaires s'oriente essentiellement vers les appareils de type serre, construits en bois et métal, couverture de verre à vitre. Il convient de citer les travaux de Richard (Monaco), Ginestous (Paris et Tunis), Seltzer (Alger), Weynberg et Trofimov (URSS).

Parallèlement, quelques chercheurs se sont intéressés à des dispositifs à températures plus élevées

ou sous vide : Pouget (Alger), Abbot (États-Unis) et Trofimov (URSS).

Ces premiers essais dans leur ensemble relevaient de la méthode expérimentale synthétique qui consistait, sans une connaissance approfondie des paramètres en cause, à réaliser directement les appareils à partir d'une idée de base, pour ensuite constater le résultat global obtenu.

Alors qu'en France et ailleurs, après la flambée d'intérêt des années 1925 à 1930, la question retombait dans un quasi oubli, quelques travaux se poursuivaient en URSS, en particulier ceux de Tekoutchev.

Il faut attendre la guerre, et surtout la période qui a suivi immédiatement celle-ci, pour voir s'épanouir une floraison d'appareils et de travaux en de nombreux pays, qui en quelques années ont complètement changé l'étendue et la nature de nos connaissances.

L'intérêt a été général dans le monde entier, et il est difficile de nommer l'ensemble des chercheurs qui ont contribué à cet effort collectif et soutenu, qui continue de se développer encore de nos jours, comme peuvent l'attester le nombre et la qualité des mémoires présentés à cette Section de la Conférence.

Ce nouvel effort a d'abord repris la forme de celle des années 1925, et a conduit à un nombre de réalisations d'appareils de forme, de nature et de conception très différentes et à l'étude de l'emploi de très nombreux matériaux de construction. Mais très rapidement, et en particulier sous l'impulsion du Office of Saline Water in the U.S.A., du Laboratoire héliotechnique de Krzhizhanovsky en URSS, et également des Services de l'hydraulique en Algérie et de l'Organisation commune des régions sahariennes, les études ont pris un caractère plus systématique de recherche des données de base, tant par l'expérimentation que par les considérations théoriques et le calcul.

Nous nous trouvons donc maintenant à l'orée d'un nouveau stade de développement de la distillation solaire, ou plus généralement du dessalement par emploi de l'énergie solaire. L'ensemble des enseignements et considérations théoriques réunis permet maintenant de soumettre à une analyse préalable détaillée les problèmes que l'on a à résoudre et de déterminer ainsi, soit les solutions à adopter, soit les directives essentielles à donner aux recherches ultérieures.

La présente conférence se place donc à une période charnière. C'est ce qui en fait le grand intérêt, et il serait fort souhaitable que dans les conjonctures actuelles puissent être dégagées d'une façon rationnelle et appuyées sur des données matérielles indiscutables des conclusions provisoires pouvant guider l'effort collectif dans les années à venir.

### Point des connaissances actuelles

#### DISTILLATEURS DE PETITES DIMENSIONS

Les distillateurs de petites dimensions sont appelés à répondre aux besoins en eau potable d'individus isolés ou de petits groupes humains et à des besoins spéciaux de faible importance unitaire (eau pour

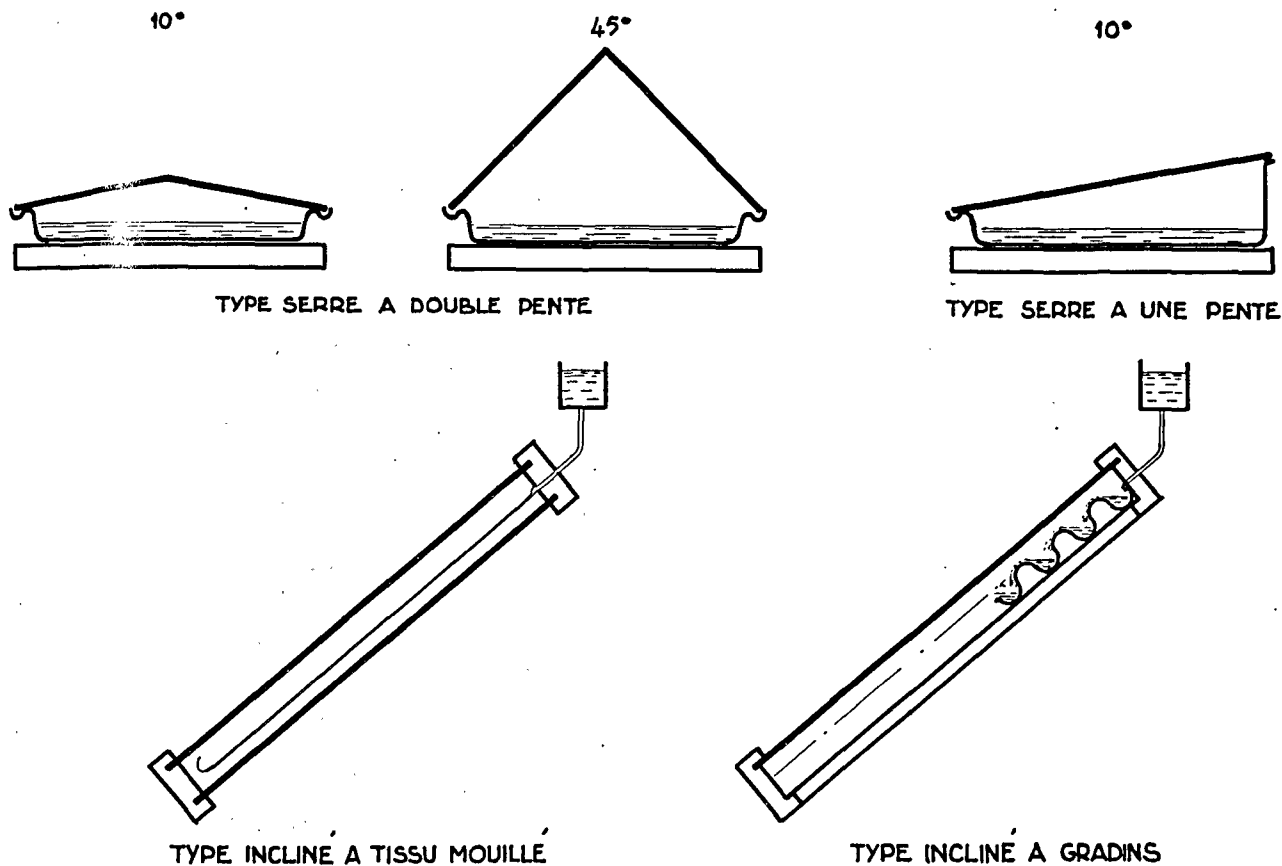


Figure 1. Petits distillateurs

accumulateurs de voiture ou de station téléphonique, radio ou météo, infirmerie et pharmacie de petits postes, système hydraulique de refroidissement des moteurs, etc.). Ces besoins se limitent à 3-15 litres par personne et par jour, à quelques litres ou quelques dizaines de litres au plus pour les besoins spéciaux susmentionnés.

C'est là un domaine où la distillation solaire peut rendre, et rend d'ailleurs, des services fort appréciés sur le plan humain, même si son importance économique générale à l'échelle des problèmes mondiaux ou nationaux n'est évidemment pas essentielle.

Les distillateurs solaires utilisés sont : ceux du type serre à cuve horizontale, encore appelés distillateurs à toit (roof type solar stills) ou boîtes chaudes (hot boxes), et ceux du type serre à mèche humidifiée par la saumure ou à cuve en gradins, encore appelés distillateurs inclinés (tilted solar stills) ou distillateurs à surface mouillée (stills with soaked surface).

Plus rarement ont été proposés ou réalisés, pour la production de faibles quantités d'eau, des distillateurs à concentration avec condensation séparée de la vapeur produite à plus de 100 °C, le système de condensation pouvant servir de départ à un distillateur à multiples effets.

La description détaillée des appareils du type serre à cuve horizontale ou à mèche a déjà été faite

dans plusieurs conférences ou rencontres internationales précédentes. On la trouve également dans plusieurs mémoires publiés dans la présente section (Hafez et Elnesr S/63, Howe S/29, Fontan et Barasoain S/73, Gomella S/107, Nebbia S/113, Khanna et Mathur S/115, Baum S/119).

Ce sont des appareils dont nous avons maintenant une connaissance approfondie. Ils ont été soumis à des expérimentations diverses, sont en service en divers points du globe, et ont fait l'objet de bilans thermodynamiques et d'expérimentations systématiques concernant les paramètres de base (Howe S/29, Gomella S/107, Baum S/119).

Construits suivant les règles rationnelles que l'on peut tirer de l'analyse et de l'expérimentation, ces appareils peuvent atteindre une efficacité de 70 p. 100.

$$\left( \text{Efficacité} = \frac{\text{énergie de vaporisation unit.} \times \text{production unit.}}{\text{énergie rayonnante unitaire captée}} \right)$$

On peut affirmer qu'en ce qui concerne leur conception même, ils ne sont plus guère perfectibles dans leur principe. La seule voie de progrès toujours ouverte, et où le progrès serait d'ailleurs très souhaitable, réside dans la recherche du meilleur mode de construction de façon à conduire à des prix de revient moins élevés.

Le débit de ce petit appareil, construit avec le plus de soin possible et en respectant les règles définies

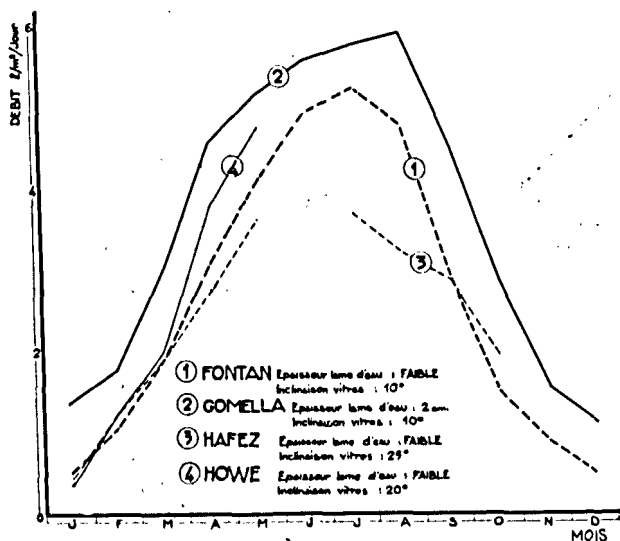


Figure 2. Débit d'eau distillée pour différents distillateurs

par le calcul et l'expérimentation, devrait être d'environ 6 litres/m<sup>2</sup>/jour en moyenne annuelle, dans les pays où la valeur de l'insolation horizontale moyenne annuelle atteint 5 500 kcal/m<sup>2</sup>/jour (voir figure 2).

En fait, il faut avoir présent à l'esprit, comme le montre l'expérience, qu'en hiver le rendement des appareils les mieux construits tombe sensiblement au-dessous des valeurs enregistrées au cours du reste de l'année. L'inclinaison des rayons du soleil, qui augmente les pertes par réflexion, la plus courte durée de l'insolation quotidienne, qui accroît la valeur relative des calories perdues au cours de la « mise en régime » matinale, ainsi que d'autres facteurs, conduisent à adopter pour la valeur pratique de rendement des distillateurs solaires des nombres plus faibles, à savoir, 60 à 50 p. 100.

Dans ces conditions, les productions qui peuvent être raisonnablement espérées dans les régions où l'utilisation des distillateurs solaires peut être envisagée sont de l'ordre de 1,5 à 2 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/an, c'est-à-dire 4, 1 à 5,35 litres/m<sup>2</sup>/jour en moyenne annuelle.

La production réelle est de l'ordre de 7 à 8 litres/m<sup>2</sup>/jour au maximum en été, pour tomber quelquefois à 1 litre/m<sup>2</sup>/jour, et même moins, au cours de certaines journées d'hiver.

Ces variations saisonnières et quotidiennes très importantes constituent un point qui nous paraît devoir être souligné tout particulièrement.

Remarquons aussi que toute construction d'un appareil du type serre s'écartant des règles optimales conduira à une moyenne plus faible.

On a cherché quelquefois à opposer les deux principaux modes de réalisation des appareils du type serre, c'est-à-dire, ceux à cuve horizontale et ceux à mèche. C'est là une erreur. Ils représentent deux réalisations différentes en leurs détails, mais qui s'appuient sur le même principe.

Le critère de choix doit être celui du prix de revient de l'eau distillée produite.

On peut cependant remarquer avec Baum (S/119) que le distillateur à mèche, incliné sur l'horizontale, est mieux adapté à l'emploi sous des latitudes relativement élevées (30° à 40°), car l'inclinaison du collecteur solaire est favorable à la collecte par unité de surface de collecteur d'une quantité d'énergie rayonnante supérieure à celle captée dans la disposition horizontale qui est obligatoire pour les appareils à surface libre.

On peut par conséquent conclure que les appareils à mèche sont, dans leur principe, mieux adaptés aux pays éloignés de l'équateur, et que les appareils à cuve horizontale le sont par contre aux pays tropicaux ou équatoriaux.

Nebbia (S/113) et Wilson ont par ailleurs cherché à concilier la surface d'eau libre et le clapet à énergie rayonnante vertical en réalisant un appareil à vitres verticales dans lequel l'eau à évaporer est disposée dans une série de cuves superposées (figure 3). Cette sorte d'appareil est particulièrement bien adaptée à l'emploi de la distillation solaire dans les régions tempérées, voire polaires.

On a cherché dans les petits distillateurs à séparer le chauffage de l'eau de la condensation ultérieure de la vapeur produite. Il faut séparer deux cas bien distincts, celui des collecteurs sans concentration et celui des dispositifs à concentration.

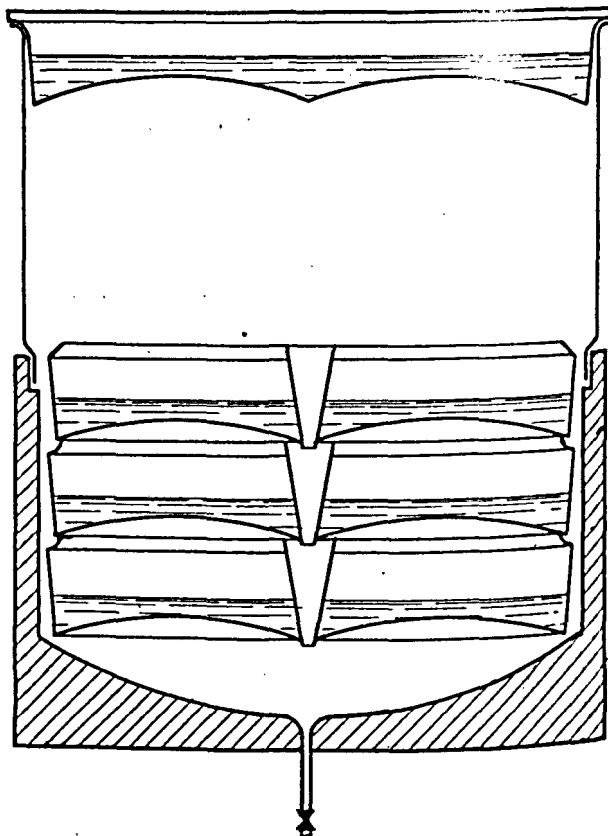


Figure 3. Distillateur à effets multiples



Dans le premier cas, on se heurte à deux obstacles fondamentaux :

a) D'abord le rendement plus faible des collecteurs plats sélectifs destinés uniquement au chauffage de l'eau si on le compare à celui des collecteurs plats distillants du type serre (Baum S/119, Gomella S/107). Pour une même température de l'eau, les pertes par rayonnement sont plus faibles dans le cas du distillateur; de plus, les calories évacuées par la surface de condensation de la serre sont pour leur plus grande part utiles au processus de dessalement, contrairement aux pertes du collecteur à eau chaude non distillant.

b) Ensuite la faible vitesse de transfert, sans moyens de convection forcée, de l'air humide du sein de l'évaporateur au sein du condensateur séparé (Baum S/119).

Comme dans un distillateur du type serre la surface de condensation est tout à fait suffisante pour l'évacuation des calories, voire surabondante dans certaines conditions de fonctionnement, un dispositif simple effet avec collecteur plat d'une part et condensateur séparé d'autre part ne peut être que plus compliqué et plus cher, et ne doit conduire qu'à une production plus faible pour la même insolation qu'un distillateur simple effet du type serre.

La séparation du chauffage et de la condensation n'est donc concevable que s'il existe un apport d'énergie extérieure assurant la circulation forcée, ou si la production de vapeur se fait à une pression suffisante pour assurer naturellement le transfert de l'air humide.

Par ailleurs, la collecte de l'énergie doit se faire avec une efficacité semblable ou, mieux encore, meilleure que dans le cas des collecteurs plats ou sélectifs ordinaires.

L'utilisation des collecteurs plats sélectifs à surface extérieure de faible émissivité peut être envisagée pour le chauffage de l'eau à distiller au voisinage de 100°C. L'application d'un tel schéma pour la distillation des eaux saumâtres ne nous a pas été signalée.

Des hautes températures peuvent s'obtenir également par des systèmes focalisants (figure 4). La construction de miroirs réflecteurs qui a longtemps

été considérée comme délicate et onéreuse peut être maintenant envisagée d'une façon plus rustique en employant des matières plastiques réfléchissantes car, dans le cas du chauffage de l'eau, une qualité optique sommaire est suffisante.

Il semble également que l'utilisation de réflecteurs cylindro-paraboliques à chaudières tubulaires disposées le long de la focale simplifierait considérablement l'exploitation du dispositif focalisant, et en particulier permettrait soit de supprimer le dispositif héliostatique, soit, si on ne prévoit pas l'emploi de ce dernier, d'éviter de trop nombreuses opérations quotidiennes de réorientation du réflecteur.

Parmi les réalisations ou les projets décrits, on peut citer Weynberg (1939) qui, avec un miroir parabolique de 2,42 m<sup>2</sup> et un condensateur à plusieurs étages, a produit 23 litres/jour, et Baum (S/119) qui dans son mémoire étudie en détail les possibilités de production de distillateurs à multiples effets, en fonction de la forme du réflecteur, de sa qualité optique et du nombre d'étages de la distillation.

On peut retenir que, pour être utilisable à cette fin, un miroir cylindro-parabolique doit déjà être réalisé avec un certain soin (coefficient de concentration minimum de 30) et que les possibilités de production sont alors pour cinq étages de 2 à 2,2 litres par heure et par m<sup>2</sup> de miroir, soit 20 à 25 litres/jour/m<sup>2</sup> au cours des saisons.

Si nous considérons l'ensemble des connaissances accumulées à ce jour, nous pouvons constater ce qui suit :

a) L'appareillage distillatoire solaire de petites dimensions sera à simple effet avec effet de serre, ou à multiples effets avec dispositif de concentration.

b) Nous connaissons bien maintenant les critères principaux de qualité auxquels doivent répondre les distillateurs simple effet de type serre : température de régime élevée, inertie thermique faible (lame d'eau mince), distance évaporateur-condenseur faible, ombres portées sur la surface évaporatoire. Pour les appareils les plus faibles possibles répondant à ces conditions, nous pouvons prévoir la production de 1,5 à 2 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/an de collecteur plat, avec de fortes fluctuations quotidiennes et saisonnières.

c) Les appareils à concentration, pour lesquels l'expérience acquise est moins grande, peuvent néanmoins être calculés avec assez d'exactitude, et leurs performances peuvent être estimées de 3 à 5 fois supérieures à celles des distillateurs du type serre, soit 4,5 à 10 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/an de réflecteur.

d) Les matériaux qui serviront à la construction des distillateurs seront soumis à des conditions de service très dures : corrosion, entartrage, déformation par humidité, déformation par dessiccation, déformation sous l'effet de fortes variations de température, érosion éolienne, action des agents atmosphériques, vieillissement sous l'effet des rayons actiniques. Une bonne résistance de matériaux à ces agents d'agression doit être obtenue, car, suivant les parties en cause, la transparence, l'étanchéité à l'eau et à l'air, l'absence de décollements et de fissures et le maintien

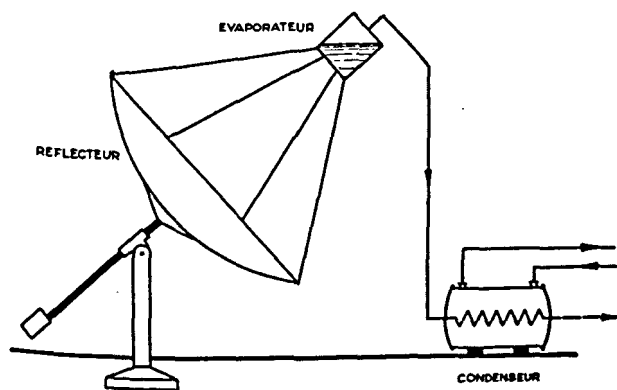


Figure 4. Petits distillateurs à réflecteur

de la planéité peuvent avoir une importance considérable sur le rendement pratique de l'appareil.

Le constructeur et l'utilisateur ont le choix entre différents types d'appareils et de matériaux.

Le choix entre les différents appareils dépendra de plusieurs facteurs : fixité ou mobilité de l'installation, situation géographique, utilisation permanente ou périodique, présence ou absence d'eau de réfrigération, qualité de la main-d'œuvre disponible et importance du facteur prix de revient.

La mobilité de l'installation écarte l'emploi d'appareils à serre du type classique à cuve rigide. Les appareils en film plastique à mèche du type Bjorksten ou l'appareil gonflable sphéroïde utilisé dans les canots de sauvetage de la Marine des États-Unis seront d'un usage plus commode.

De même, les appareils à concentration se prêteront à l'équipement d'un convoi lourd à condition que les miroirs réfléchissants soient repliables sur eux mêmes.

La situation géographique peut donner la préférence aux appareils horizontaux près de l'équateur, aux appareils à mèche aux latitudes plus élevées. Les appareils à concentration s'emploient sous toutes les latitudes.

L'utilisation permanente peut donner la préférence à des appareils ne nécessitant pas de réorientation (appareil type serre).

L'absence d'eau de réfrigération aisément accessible empêchera l'utilisation d'appareils à condensation séparée.

La qualité de la main-d'œuvre disponible pourra dans certains cas imposer l'usage des appareils les plus rustiques de conception et d'exploitation (serre à cuve horizontale).

Enfin, le facteur prix de revient sera primordial pour les appareillages fixes *a priori* destinés à desservir des centres habités qui ont des besoins en eau plus importants et une grande exigence d'économie. Pour les équipes mobiles, par contre, le facteur « commodité d'emploi en déplacement » est le plus important.

Le choix entre les différents appareils du type serre sera souvent déterminé par la valeur du prix de revient de l'eau, qui lui-même est fonction du prix de revient unitaire de l'appareil et de la longévité de ce dernier.

Pour les petits appareils, des prix unitaires très bas ont été quelquefois avancés dans le passé. Il est certain en particulier que la réalisation d'appareil à mèche à enveloppe transparente plastique peut être rendue d'un prix relativement faible dans le cas d'une production en masse. Des renseignements définitifs sur le prix de production et sur la longévité des appareils à films plastiques restent encore à obtenir. Pour les petits appareils du type verrière, les appareils construits avec des matériaux de grande longévité (amiante, ciment/verre, polyester stratifié/verre) les prix unitaires oscillent entre 72 à 145 NF/m<sup>2</sup>.

Ces prix peuvent certainement être diminués sensiblement par une production en grande quantité, et des prix de l'ordre de 50 à 100 NF/m<sup>2</sup> ne sont pas absurdes.

Une longévité de 20 ans peut parfaitement être admise, ce qui conduit (dans l'hypothèse de 1,5 à 2 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/an) à des prix de revient de l'eau de l'ordre de 1,25 à 3,33 NF/m<sup>3</sup>, en supposant une exploitation et un entretien par de la main-d'œuvre familiale gratuite.

Ces prix sont très éloignés de ceux qui ont pu être estimés dans le passé. Je les crois très sincèrement bien plus proches de la réalité pour de tout petits appareils et pour des surfaces équipées de quelques dizaines de mètres carrés.

Si on considère l'estimation la plus faible (1,25 NF/m<sup>3</sup>), elle ne constitue que le double ou le triple du prix qui est admis pour certaines distributions d'eau potable urbaines. Appliquée à la distillation de l'eau de mer, elle est tout à fait compétitive avec les prix de procédés classiques. Il y a lieu cependant de remarquer que cette estimation reste à mon avis très optimiste, même dans l'hypothèse d'une production de petits distillateurs en très grande série. Dans l'état de choses actuel, le prix réel de l'eau distillée solaire dans des petites installations doit osciller entre 5 et 10 NF/m<sup>3</sup> suivant les lieux et l'appareil.

Je ne dispose pas de renseignements sérieux sur le prix de revient de l'eau distillée pour des appareils à concentration à multiples effets. Compte tenu de leurs possibilités de production, qui sont de trois à cinq fois supérieures à celles des distillateurs du type serre à cuve horizontale, on peut conclure que le prix de revient de l'installation complète, ramené au m<sup>2</sup> de surface de miroir, devrait être de l'ordre de 200 à 725 NF/m<sup>2</sup> pour être compétitif avec les appareils du type serre, et de 150 à 500 NF/m<sup>2</sup> pour être compétitif avec les appareils du même type construits en grande série.

C'est là un objectif, pour les estimations inférieures surtout, qui paraît très difficile à atteindre. Il apparaît ainsi que l'emploi d'appareils à concentration de petites dimensions ne peut être envisagé, et dans certains cas seulement, qu'en raison de facteurs de commodité, en excluant les considérations de prix de revient.

Quelles sont donc les perspectives dans le domaine des distillateurs de petites dimensions? Très honnêtement, il faut reconnaître que ces dernières années on piétine. C'est une question de prix de revient.

L'emploi des matières traditionnelles grève le prix de revient d'une charge de main-d'œuvre de façonnage que seule une production en très grande série pourrait faire sensiblement tomber.

De plus, le volume et le poids des appareils rigides produits vient grever lourdement le prix de revient rendu sur les lieux d'utilisation, et c'est là un point qu'il ne faut pas négliger, puisque la production

en grande série s'oppose en fait à la réalisation des appareils sur place.

Remarquons cependant qu'il existe une méthode d'aborder le problème du prix de revient, qui consiste à en masquer la vraie valeur en l'intégrant volontairement dans des dépenses générales d'urbanisme ou d'habitat.

Il faut considérer d'une part qu'un mètre carré de distillateur solaire du type serre classique est susceptible de fournir l'eau de boisson nécessaire à un seul individu et que, d'autre part, le prix de ce mètre carré, même dans l'état actuel des prix de construction des habitations, est du même ordre que celui d'un mètre carré de logement très sommaire et qu'il est de très loin inférieur à celui d'un mètre carré d'un logement non luxueux.

Dans ces conditions, on peut se demander si une méthode d'utilisation de l'énergie solaire qui peut être adoptée d'ores et déjà ne consisterait pas à augmenter le capital investi dans les logements d'une part correspondant à une fraction de  $m^2$  ou même à  $1 m^2$  de surface habitée réservée à un individu, en dotant ces logements neufs de distillateurs solaires du type individuel établis sur le toit des maisons.

L'action des détergents qui permet l'utilisation des eaux dures, saumâtres et même celle de l'eau de mer pour les besoins de propreté ou du nettoyage permet d'envisager sérieusement une distribution d'eau filtrée et stérilisée, mais non déminéralisée, dans les distributions publiques des nouvelles cités, avec une production séparée à chaque maison de l'eau de boisson saine et potable nécessaire à ses habitants.

Pour l'avenir, l'abaissement du prix de revient pourra certainement provenir de l'emploi des matières plastiques.

Dans l'état de choses actuel, elles ont trois inconvénients : le prix de revient encore élevé, la non mouillabilité, et le vieillissement rapide sous l'effet du temps et des agents atmosphériques, et plus particulièrement du rayonnement ultraviolet. Elles présentent par contre de grands avantages : légèreté, non fragilité, et facilité de mise en œuvre.

Si l'on considère les progrès considérables accomplis ces dernières années dans la lutte contre les trois inconvénients principaux, on peut être résolument optimiste et espérer aboutir à des prix de revient, tenant compte de la longévité, qui seraient très inférieurs aux chiffres actuels.

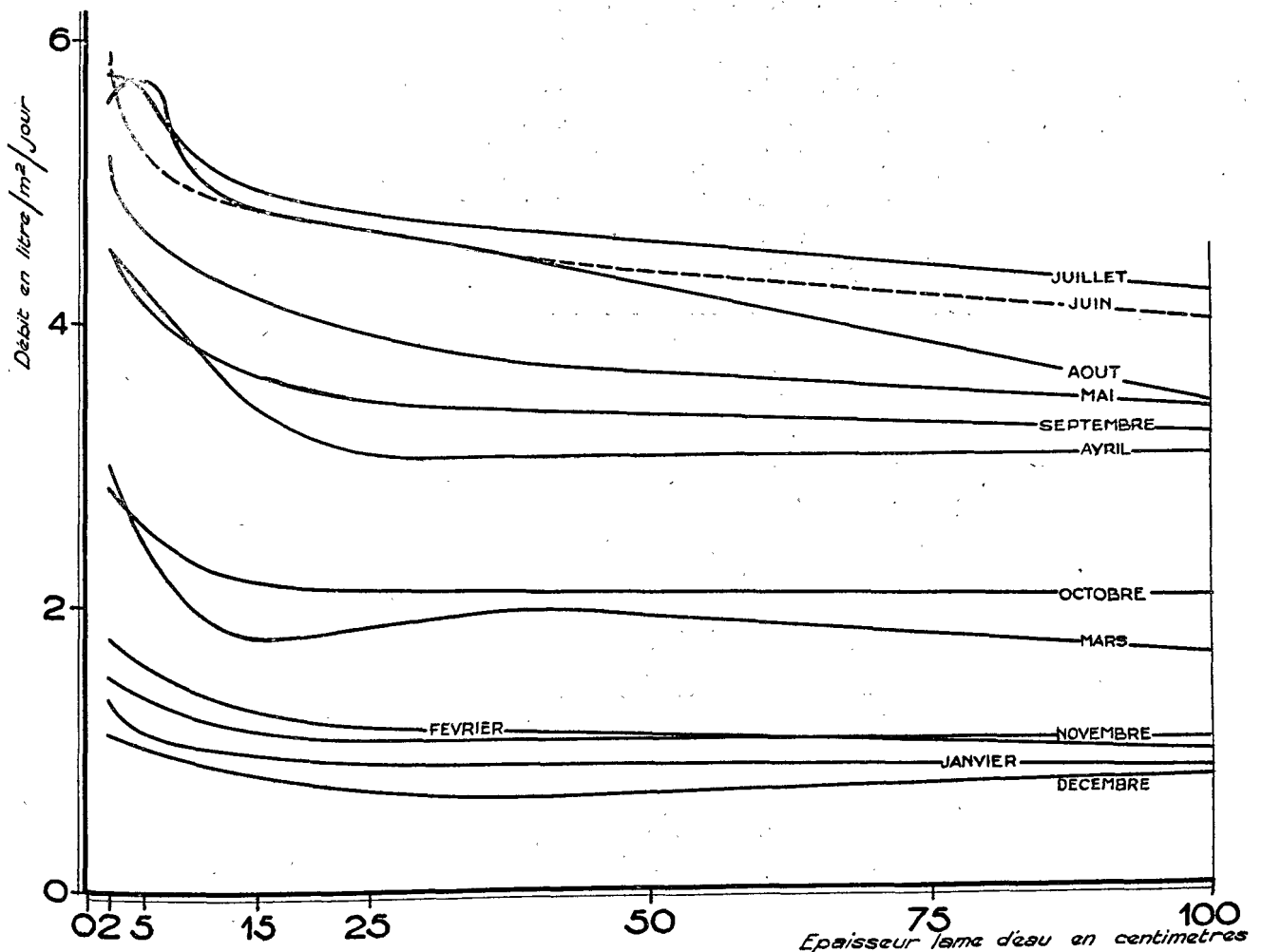


Figure 5. Épaisseur de la lame d'eau et production quotidienne

### MÉTHODES D'APPROCHE POUR LA RÉALISATION DE DISTILLATEURS DE GRANDES DIMENSIONS

Dans la conception d'un distillateur de grandes dimensions, on peut soit extrapoler les dimensions d'un appareil de petites dimensions, soit chercher à construire un appareil dérivé mais différent dans certaines parties, soit encore faire appel à des dispositifs complètement différents, avec emploi de l'énergie extérieure non solaire comme énergie auxiliaire pour assurer des transferts de masse d'eau ou de vapeur, etc.

Une méthode également signalée par Gomella en 1957 comme tout à fait admissible dans son principe, idée qui est reprise par Howe (S/29), consiste à réaliser de grandes surfaces de distillation au moyen d'une juxtaposition d'une multitude de petits appareils.

### VERRIÈRE DE GRANDES DIMENSIONS

Depuis quelques années, il a été soutenu que la verrière à plan d'eau de grandes dimensions réalisée avec des moyens de travaux publics conduirait à des prix de revient beaucoup plus bas que ceux des distillateurs de petites dimensions. La question a été en particulier soulevée au Symposium de Washington (1957), au Colloque de Mont-Louis (1958) et au Symposium de Cleveland (1960).

A l'heure actuelle, les idées sont devenues beaucoup plus claires grâce à l'expérimentation systématique et aux calculs effectués par plusieurs chercheurs, dont certains sont mentionnés dans les mémoires présentés à la présente réunion (Strobel S/85, Howe S/29, Gomella S/107, Löf S/77, Baum S/119).

Des publications antérieures, notamment celles de J. M. Bloemer, N. A. Collins, J. A. Eibling, Maria

Telkes et B. W. Wilson, ont également contribué d'une façon fondamentale à notre compréhension du fonctionnement des appareils du type verre.

Dans ces conditions, il est maintenant possible de prévoir ce qui résultera de l'augmentation des dimensions d'un appareil verrière.

Trois communications présentent un intérêt considérable (Löf S/77, Baum S/119, Gomella S/107). Elles fournissent des conclusions précises et des éléments chiffrés qui permettent d'effectuer une comparaison entre des travaux effectués en des endroits éloignés, par des chercheurs sans liaison directe entre eux, et qui ont suivi des méthodes de travail différentes.

Baum (S/119) arrive à ses conclusions par le calcul en partant de données de base tirées d'une verrière à lame d'eau mince.

Löf (S/77) tire également des conclusions à l'aide du calcul en opérant en deux temps. À partir de données recueillies sur une verrière à lame épaisse, un jour donné du mois de mai, il établit par le calcul les équations de fonctionnement d'une verrière à lame d'épaisseur nulle. Ensuite, à partir de ces équations de base, il calcule les modifications apportées par la prise en compte de l'inertie thermique introduite par des lames d'eau d'épaisseur variable (figure 5).

Gomella (S/107) a procédé d'une façon expérimentale systématique sur des verrières fonctionnant en parallèle dans des conditions identiques, à l'exception d'un seul paramètre. Il a ensuite déterminé les équations expérimentales qui traduisent statistiquement l'ensemble des observations enregistrées.

Le premier fait remarquable est la concordance qualitative des conclusions de ces trois mémoires :

Facteur	Le facteur est-il favorable à l'accroissement de la production		
	Löf	Baum	Gomella
Radiation solaire accrue . . . . .	oui	oui	oui
Température atmosphérique élevée . .	oui	oui	non mentionné
Différence température eau-vitre faible	oui	non mentionné	oui
Coefficients réflexion et absorption vitre faibles . . . . .	oui	oui	non mentionné
Température eau élevée . . . . .	oui	oui	oui
Lame d'eau mince, inertie thermique la plus faible possible . . . . .	oui	oui, implicitement	oui
Rapport de surface eau/vitre faible . .	oui		oui +
Distance eau-vitre faible . . . . .	non mentionné	non mentionné	oui
Vent faible. . . . .	oui	non mentionné	non mentionné

+ oui pour  $T > 60^{\circ}\text{C}$  < 1 pour  $T < 50^{\circ}\text{C}$ .

Par ailleurs, les valeurs numériques sont assez voisines et quelquefois coïncident remarquablement. Il faut noter que les résultats obtenus directement à l'expérimentation sont toujours légèrement plus faibles que les valeurs numériques déduites des calculs estimatifs.

Il apparaît en particulier que le calcul de Löf conduit à des résultats sensiblement plus opti-

mistes que ceux de Baum, qui par contre donnent des valeurs numériques légèrement supérieures aux valeurs obtenues avec les formules expérimentales tirées par Gomella de l'observation systématique d'appareils fonctionnant en parallèle au Sahara.

Il faut cependant remarquer que les appareils utilisés par Gomella pour l'expérimentation étaient dérivés des appareils à haut rendement construits

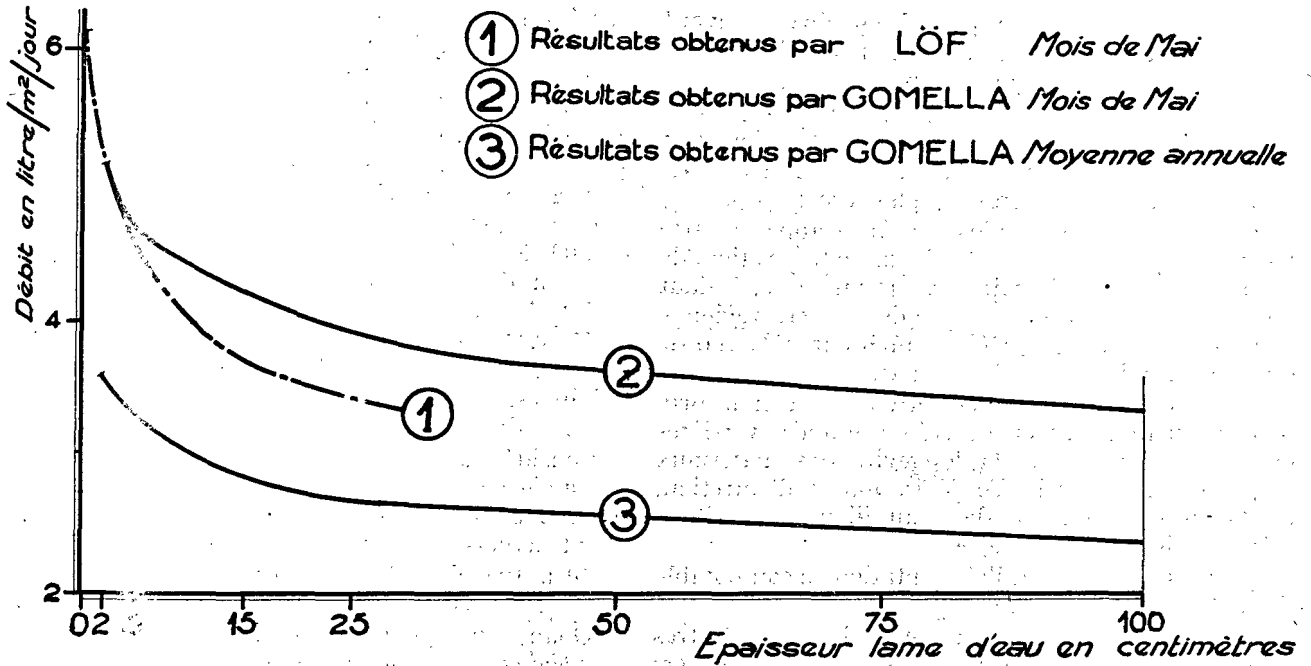
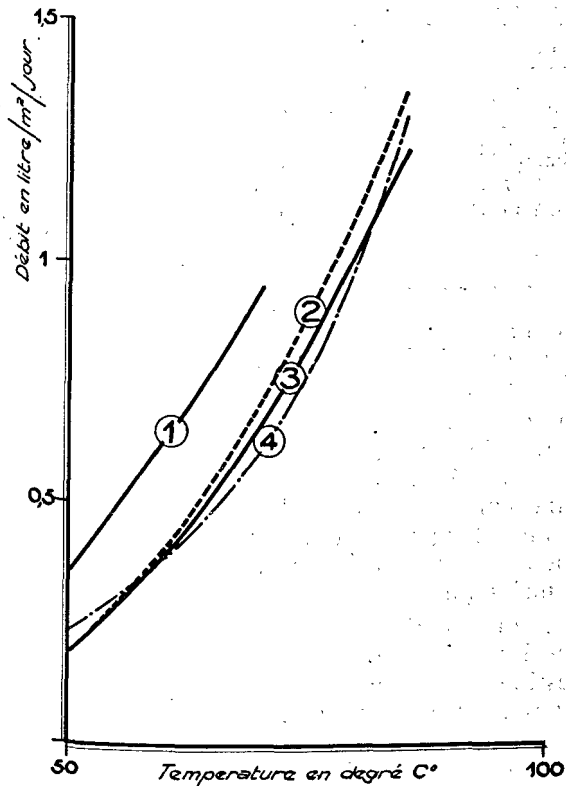


Figure 6. Épaisseur de la lame d'eau et production quotidienne



- ① LÖF Épaisseur de la lame d'eau = 0 centimètre
- ② BAUM Volume eau brute = volume eau distillée
- ③ BAUM Volume eau brute = 2 volumes eau distillée
- ④ GOMELLA Volume eau brute = 2 volumes eau distillée

Figure 7. Température de l'eau et débit

au Sahara pour l'usage pratique, mais s'en différencient légèrement par certains détails, en raison de commodités expérimentales.

Par exemple, l'appareil expérimental de 2 cm d'épaisseur de lame fournissait 15 p. 100 de moins en moyenne que les appareils non expérimentaux de même épaisseur de lame.

De ce fait, la coïncidence avec le calcul de Baum devient absolument remarquable, surtout si l'on tient compte de la température plus basse des eaux saumâtres utilisées par Gomella (15 °C contre 20 à 30 °C) et du volume préchauffé avant évaporation (deux à trois fois plus chez Gomella que chez Baum).

Les résultats calculés par Löff et observés par Gomella coïncident également fort bien, si l'on met en parallèle les valeurs relatives :

Production en fonction de l'épaisseur de lame. Pourcentage de la production à distance 0 cm

Épaisseur (cm)	Löff	Gomella
0 . . . . .	100 p. 100	100 p. 100
2 . . . . .	86	80
5 . . . . .	76	74,5
15 . . . . .	60,5	63,5
40 . . . . .	54	58,5
100 . . . . .	—	53

Comme l'indiquent Löff, Strobel, Baum et Gomella, un distillateur verrière de grandes dimensions, pour une même intensité de rayonnement reçue, fonctionne obligatoirement à un régime de température inférieur à celui d'un petit appareil. Si on examine les différentes réalisations proposées, on peut estimer que la production initiale de ces grandes verrières sera de l'ordre de 70 à 50 p. 100 de celles des petits appareils.

Les grandes verrières produiront donc, suivant leur mode de réalisation et l'endroit où elles seront exploitées, 0,75 à 1,4 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/an.

Ces données de base, qui sont maintenant établies par le calcul et vérifiées par l'expérience, permettent de juger de l'intérêt que peut présenter la construction d'une verrière de très grandes dimensions.

Pour qu'il soit préférable de faire appel à cette technique plutôt qu'à celle de la juxtaposition de petits appareils construits en grande série, il faut que la construction de la grande verrière revienne à un prix unitaire largement inférieur à la moitié du prix unitaire d'un petit appareil.

De plus, ces données permettent de fixer le prix de construction du mètre carré des grandes verrières en tenant compte de la longévité des matériaux employés et des frais d'exploitation et d'entretien, de façon que l'emploi de l'eau distillée d'origine solaire puisse être envisagée :

a) Dans le futur pour l'alimentation en eau potable de ville et pour l'irrigation;

b) Dans l'immédiat pour concurrencer les autres procédés de déminéralisation, là où ces derniers trouvent actuellement usage malgré le prix assez

élevé du traitement (distillation thermique, électrodialyse, congélation).

Pour être admise par l'usager, la déminéralisation ne doit pas dépasser un certain prix de revient. Selon l'utilisation envisagée, nous avons adopté les prix complémentaires suivants comme acceptables :

0,02 à 0,05 NF/m<sup>3</sup> pour l'eau d'irrigation,

0,15 à 0,50 NF/m<sup>3</sup> pour l'eau potable de ville,

2,00 NF/m<sup>3</sup> pour la déminéralisation des eaux saumâtres, dans l'état de choses actuel,

5,00 NF/m<sup>3</sup> pour la déminéralisation des eaux de mer, dans l'état de choses actuel.

Le prix de revient de l'exploitation d'une verrière solaire est très différent suivant que l'on tient ou non compte du prix de la main-d'œuvre nécessaire.

Considérons d'abord les *petites installations, sans main-d'œuvre d'exploitation payée*. La verrière solaire, pour pouvoir concurrencer les procédés de dessalement actuels, devrait revenir à :

50 à 100 NF/m<sup>2</sup> pour traiter l'eau de mer,

20 à 40 NF/m<sup>2</sup> pour traiter les eaux saumâtres.

Quant aux *grandes installations avec main-d'œuvre d'exploitation payée*, le tableau suivant donne la gamme des prix de revient admissibles :

Capacité de traitement		Prix de revient maximum admissible			
m <sup>2</sup> /an	m <sup>3</sup> /jour	Production actuelle		Production future	
		eaux de mer	Déminéralisation des eaux saumâtres	eau potable pour villes	eau d'irrigation
10 000	27	18 à 36 NF	impossible	impossible	impossible
100 000	270	44 à 97 NF	14 à 27 NF	impossible	impossible
1 million	2 700	50 à 100 NF	20 à 40 NF	0,9 à 9 NF	impossible
5 millions	13 500	idem	idem	1,4 à 10 NF	0,8 à 0,80 NF
10 millions	27 000	idem	idem	idem	0,14 à 0,90 NF

Les conclusions à tirer de cet ensemble de chiffres sont fort claires.

Dans une première étape, et pour pouvoir simplement concurrencer les autres moyens de dessalement pour la fourniture d'une eau de boisson ou pour usages industriels à un prix encore élevé mais acceptable, le prix de revient installé du m<sup>2</sup> de distillateur-verrière devrait osciller entre 20 et 100 NF, suivant l'importance de l'installation, la nature de l'eau traitée, les conditions d'insolation, etc.

Dans une deuxième étape, et pour pouvoir envisager la fourniture en gros d'eau potable à des agglomérations, ce même prix devrait tomber à des valeurs comprises entre 1 et 10 NF, étant bien entendu

que le procédé ne serait économiquement applicable qu'à des installations de grande importance (plusieurs milliers de m<sup>3</sup>/jour).

La troisième étape, qui est celle de la fourniture des eaux d'irrigation, paraît tout simplement inaccessible, sauf découverte de procédés de terrassement, d'étanchement des sols et de matériaux transparents de grande longévité, d'un prix de revient qui n'est même pas envisageable à l'heure actuelle et pour les années immédiates à venir.

Les objectifs de prix de revient étant déterminés, il est intéressant de considérer les valeurs réelles ou estimées à l'heure actuelle pour la construction de grandes verrières (figure 8) :

Auteur	Matériaux	Dimensions (m <sup>2</sup> )	Prix (NF/m <sup>2</sup> )
Strobel et Löf	béton/verre	230	280 à 380
Strobel et Löf	asphalte/verre	100 000	74
		270	97
		100 000	72
		100 000	61
Gomella	béton/verre	10 000	100 à 80
	asphalte/verre	10 000	65 à 50
Strobel, Löf et Edlin	film plastique (figure 9)	225	?
		100 000	?

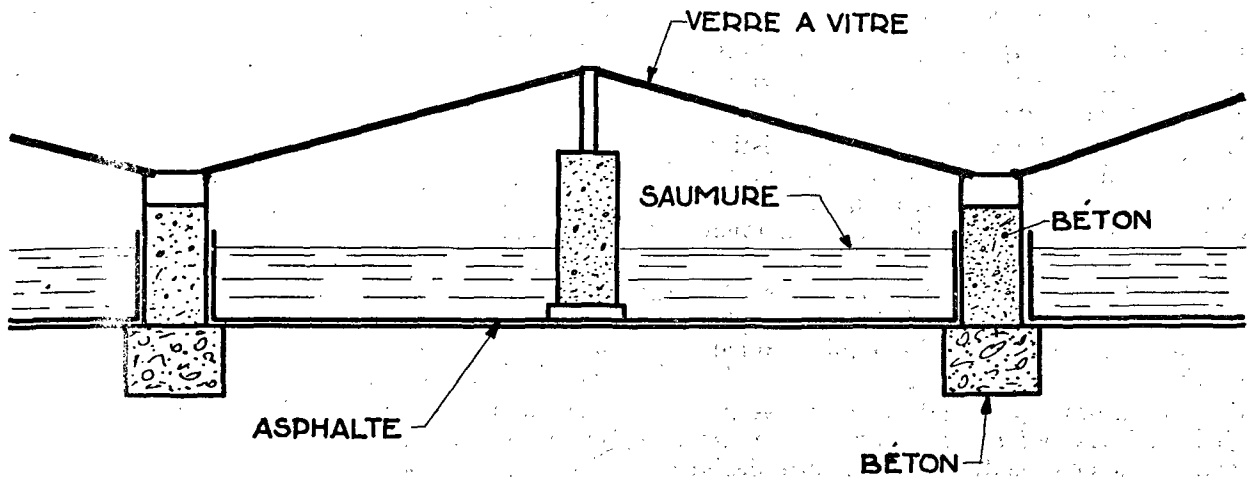


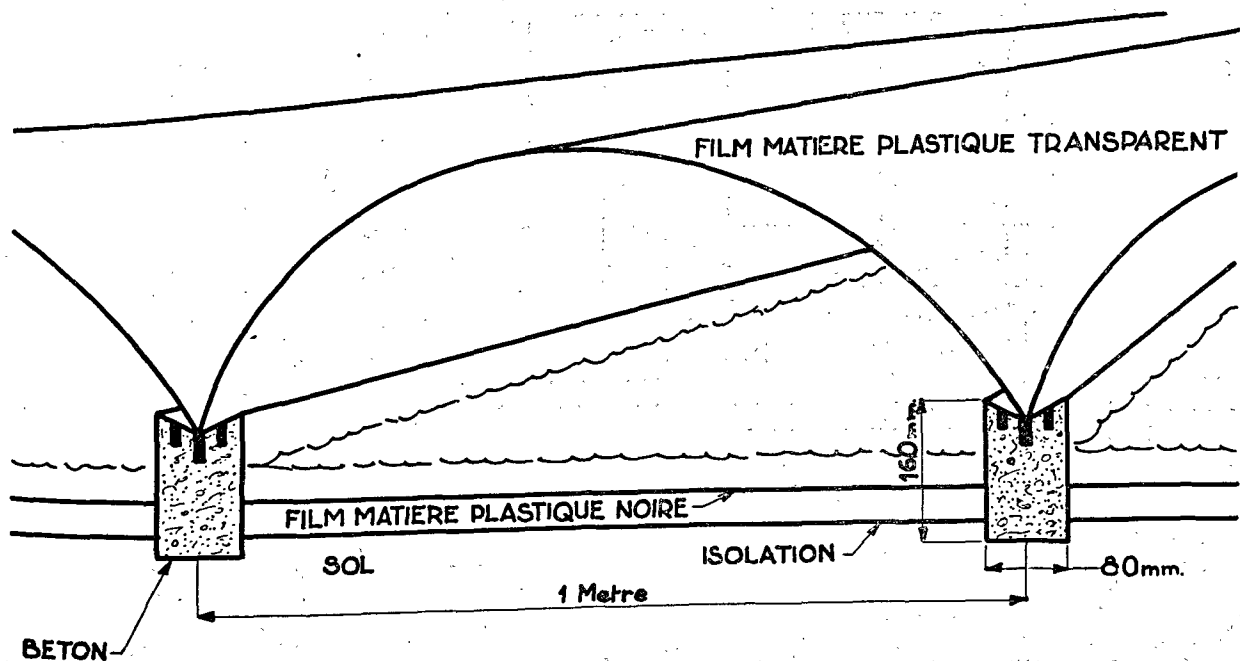
Figure 8. Grands distillateurs

A l'heure actuelle, nous en sommes donc au stade où l'on peut envisager de concurrencer par distillation avec de grandes verrières les autres procédés de dessalement, et ceci surtout dans le cas du traitement d'eaux très chargées en sels, par exemple l'eau de mer, et à condition de réaliser des installations de grandes dimensions, 10 000 m<sup>2</sup> au moins.

Nous nous trouvons donc très loin du stade où l'on pourrait envisager dans des conditions économiques acceptables d'alimenter les agglomérations en eau potable de distribution publique. Pour en arriver là, il faudrait baisser les prix de revient de 10 à 7 fois

La question de savoir s'il est possible d'obtenir une telle diminution reste à discuter. Tout ce que l'on peut dire, c'est que la méthode à suivre pour y arriver n'est pas évidente, surtout avec les matériaux traditionnels.

Il serait intéressant de connaître le point de vue des industriels et des chercheurs travaillant dans le domaine des plastiques en film. Les progrès enregistrés ces dernières années vont-ils se poursuivre à la même cadence? Dans l'affirmative, la voie la plus prometteuse pour les verrières de grandes dimensions sera celle qui conduira à un emploi généralisé de films plastiques dans leur construction.



## DISTILLATEUR EN MATIERE PLASTIQUE

Figure 9. Grands distillateurs : Distillateur en matière plastique

### JUXTAPOSITION DE PETITS DISTILLATEURS

La réalisation de très grandes surfaces de distillation est possible en faisant appel à la juxtaposition d'un nombre élevé de petits distillateurs.

Les problèmes de collecte de l'eau distillée, de distribution des eaux brutes et d'évacuation des saumures concentrées relèvent d'une technologie simple et peuvent être résolus d'une manière peu onéreuse.

Cependant, dans l'état actuel des choses, les prix les plus bas que l'on peut espérer obtenir pour une telle réalisation ont été estimés plus haut de 50 à 100 NF/m<sup>2</sup>.

C'est là un ordre de grandeur de prix tout à fait similaire à ceux des grandes verrières en asphalte et verre, et le choix entre l'un ou l'autre des modes de construction relèvera du cas d'espèce.

On peut cependant remarquer que l'exploitation d'une mosaïque de petits appareils conduira vraisemblablement à une charge de main-d'œuvre plus élevée que l'exploitation d'un ensemble de grande surface unitaire. Les juxtapositions de petits appareils seront donc mieux adaptées aux surfaces les moins grandes et aux régions où la main-d'œuvre est la moins onéreuse.

Il faut noter que Howe (S/29) estime qu'une mosaïque de distillateurs inclinés disposés sur un terrain terrassé en grande masse reviendrait sensiblement moins cher au m<sup>2</sup> installé et produirait une eau moins chère au m<sup>3</sup> qu'un distillateur béton-verre du type Löff (S/77). Notons cependant que Howe

n'a pas fait la comparaison avec le distillateur asphalte-verre de très grandes dimensions dérivé de l'appareil expérimental de Löff.

### AUTRES MÉTHODES DE DISTILLATION EN GRANDES QUANTITÉS

Les distillateurs verrières sont des appareils thermiques simple effet. Dans la technique classique des distillations industrielles, pour améliorer le rendement énergétique, on cherche d'une part à recycler l'énergie, et d'autre part, dans chacun des étages d'utilisation, à améliorer le rendement de l'utilisation de l'énergie. Il est naturel que les chercheurs aient tenté de transposer à la distillation solaire ces méthodes d'amélioration.

Les étages successifs d'un distillateur à multiples effets (figure 10) fonctionnent à des pressions de plus en plus faibles. Il y a donc lieu soit de partir d'une température élevée, ce qui exige des collecteurs à concentration ou des collecteurs plus sélectifs, soit de disposer d'auxiliaires assurant le transfert accéléré des masses de vapeur et assurant des vides partiels dégressifs.

La difficulté à laquelle se heurtent les chercheurs sera l'obtention d'un appareillage répondant à ces exigences mais restant simple et peu onéreux. Il ne faut pas en effet que la majoration de prix de revient provenant du prix de l'appareillage et des sujétions d'exploitation et d'entretien soit en fin de compte supérieure à l'accroissement de production par unité de surface de collecteur.

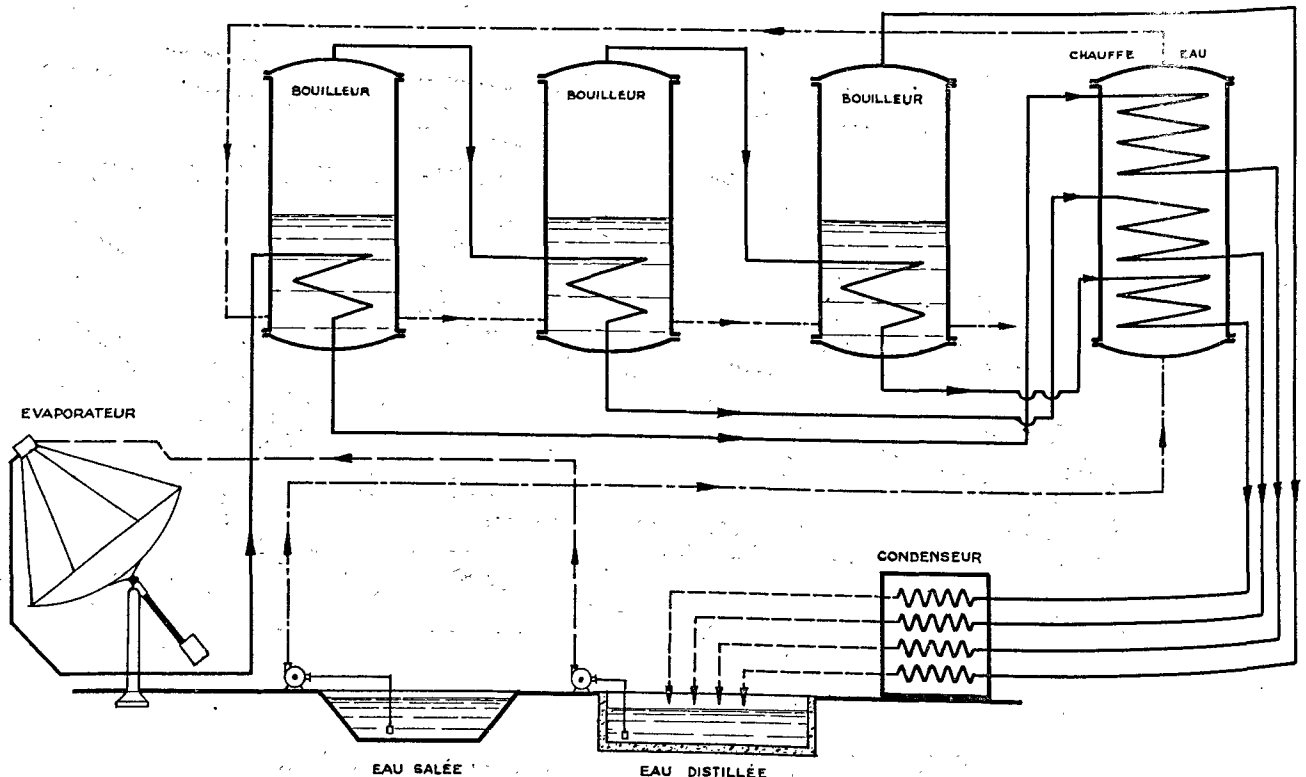


Figure 10. Grands distillateurs : installation à effets multiples



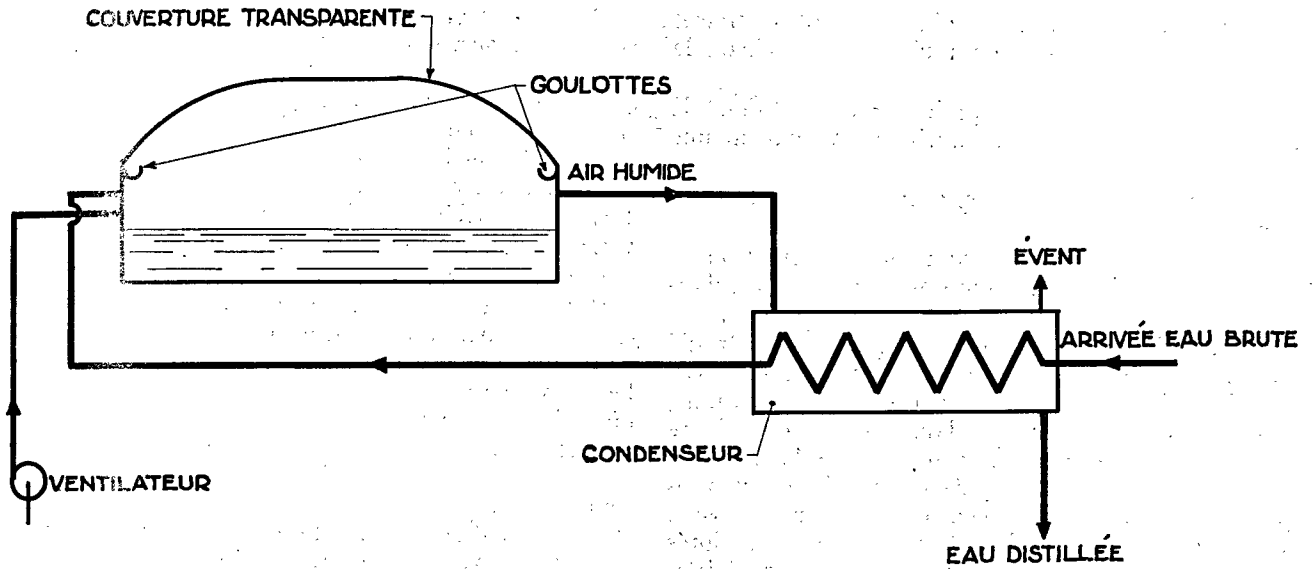


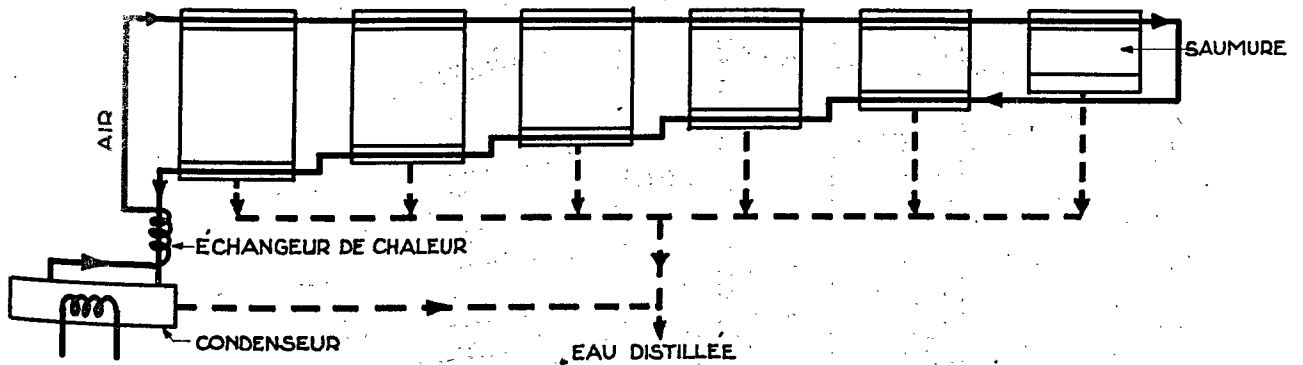
Figure 11. Grands distillateurs : nouveaux types.

Dans les installations thermiques en général, un des facteurs les plus importants qui commandent le rendement d'utilisation de l'énergie thermique est constitué par l'ensemble des différents coefficients de transmission de la chaleur, et par les coefficients de transfert de masses.

Dans l'état actuel de nos connaissances, les moyens qui permettent d'augmenter les valeurs de ces coefficients de transmission consistent à :

- a) Utiliser des parois de bonne conductivité;
- b) Soumettre les fluides au contact des parois aux conditions hydrauliques de l'écoulement turbulent;

FONCTIONNEMENT PENDANT HEURES INSOLÉES



FONCTIONNEMENT PENDANT HEURES NOCTURNES

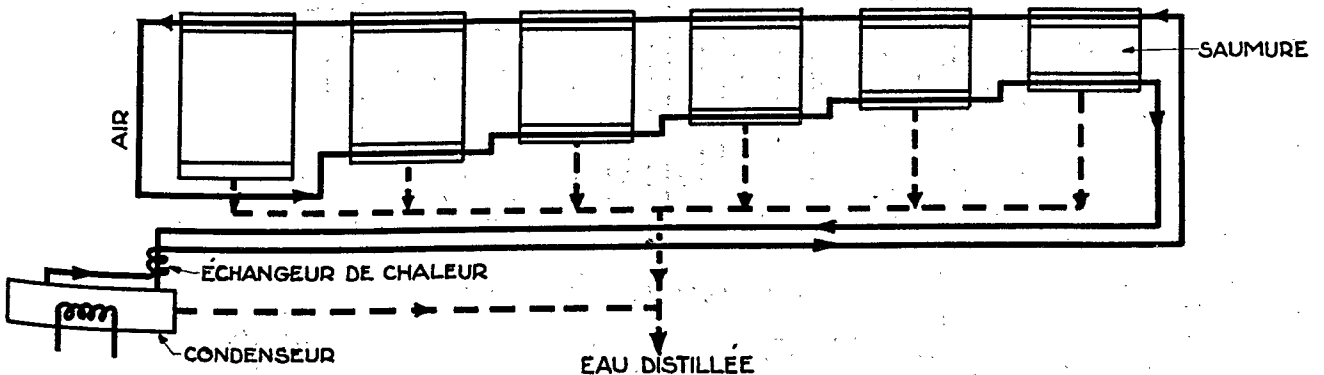


Figure 12. Grands distillateurs : nouveaux types.

c) Obtenir des films liquides les plus minces possibles, dans le cas où un film liquide sépare la vapeur de la paroi;

d) Soumettre les films liquides aux conditions de l'écoulement turbulent et imprimer à la vapeur une grande vitesse;

e) Chercher la formation d'une condensation en gouttes;

f) Éviter avec le plus grand soin la formation de pellicules de faible conductivité (tartre ou tuberculisation de corrosion).

Grune, Collins et Thompson (8/14) ont étudié expérimentalement un appareil à convection forcée de l'air humide saturé au sein d'une verrière classique, la condensation se faisant dans un appareil séparé refroidi avec les eaux alimentaires de la verrière, ce qui conduit à un recyclage partiel des calories (voir figure 11). Les coefficients de transmission de chaleur et de transfert de masse sont améliorés dans ce système en raison du mouvement de l'air et en raison de la dispersion en gouttes de l'eau alimentaire au moment de son introduction dans la verrière.

La production au mètre carré de verrière est sensiblement accrue. Pour 5 000 kcal/jour d'insolation moyenne, elle est de 7,0 litres/m<sup>2</sup>/jour, soit 2,8 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/an, c'est-à-dire 1,4 à 1,5 fois plus que ce que l'on peut escompter obtenir de petites verrières bien construites, et 2 à 3,8 fois plus que la production unitaire de grandes verrières.

Il est vraisemblable que pour un petit appareil, la complexité accrue de l'ensemble et le prix élevé des auxiliaires rendent le procédé non rentable. Par contre, pour une installation de 50 000 m<sup>2</sup> de verrière, les auteurs estiment à 55 ou 60 NF/m<sup>2</sup> de verrière l'investissement total et déterminent un prix de revient du m<sup>3</sup> d'eau déminéralisée allant entre 1,57 et 2,60 NF/m<sup>3</sup> suivant que la couverture de verrières est réalisée en film plastique ou en vitre.

Les mêmes auteurs, après avoir rejeté comme non rentables les procédés de distillation à multiples effets en partant de hautes températures obtenues avec des collecteurs à concentration, ont étendu leur première idée à un système à multiple effet où l'air en circulation forcée traverse en série des verrières dont la température de régime est de plus en plus élevée. L'obtention de températures différentes résulte de l'utilisation pour les verrières successives d'épaisseurs de lame d'eau différentes. Le sens de passage de l'air est inversé la nuit pour pouvoir continuer à extraire suivant le même principe les calories accumulées dans les verrières à lame épaisse (figure 12).

Les auteurs, faute de données expérimentales n'ont pas présenté d'étude estimative économique.

Les mêmes auteurs sont allés plus loin dans la logique de leur conception et ont également étudié par le calcul un dispositif reproduisant dans son principe les différentes parties d'un distillateur indus-

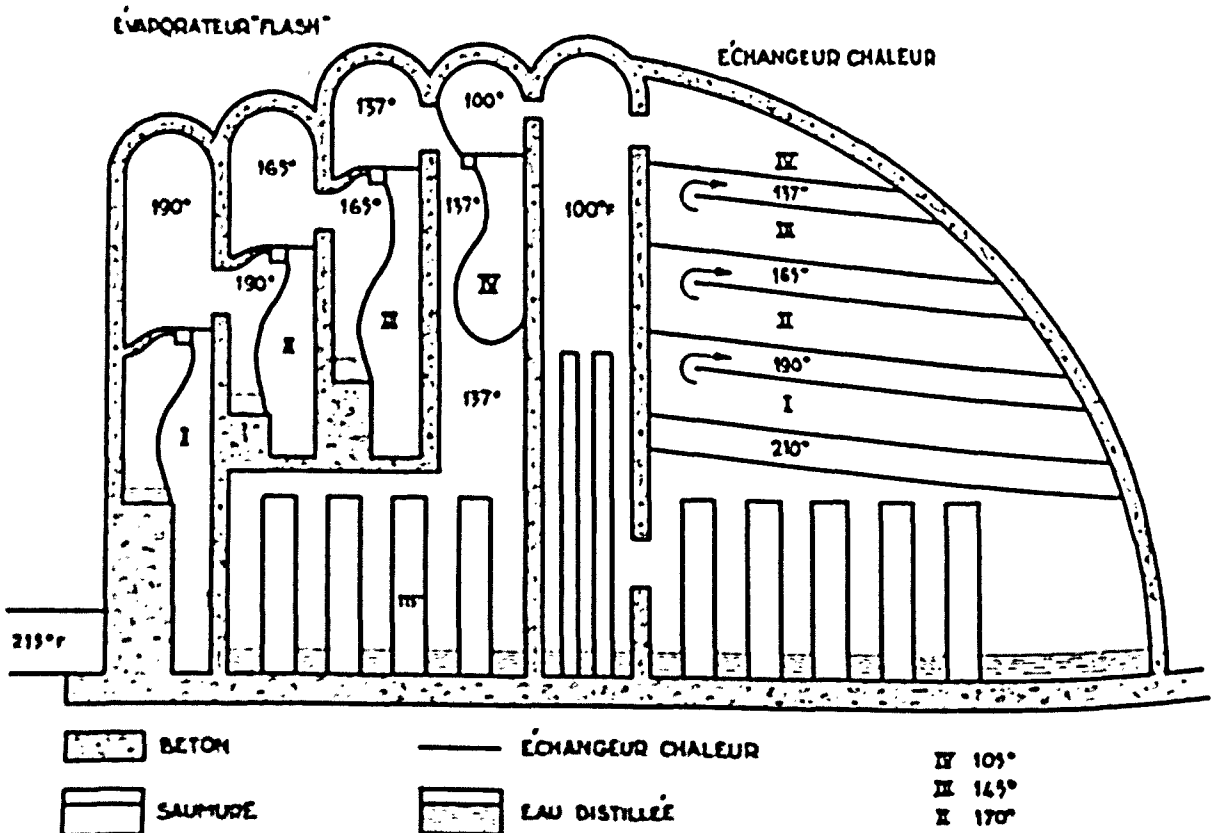


Figure 13. Grande distillateurs : nouveaux types, distillateur à effets multiples

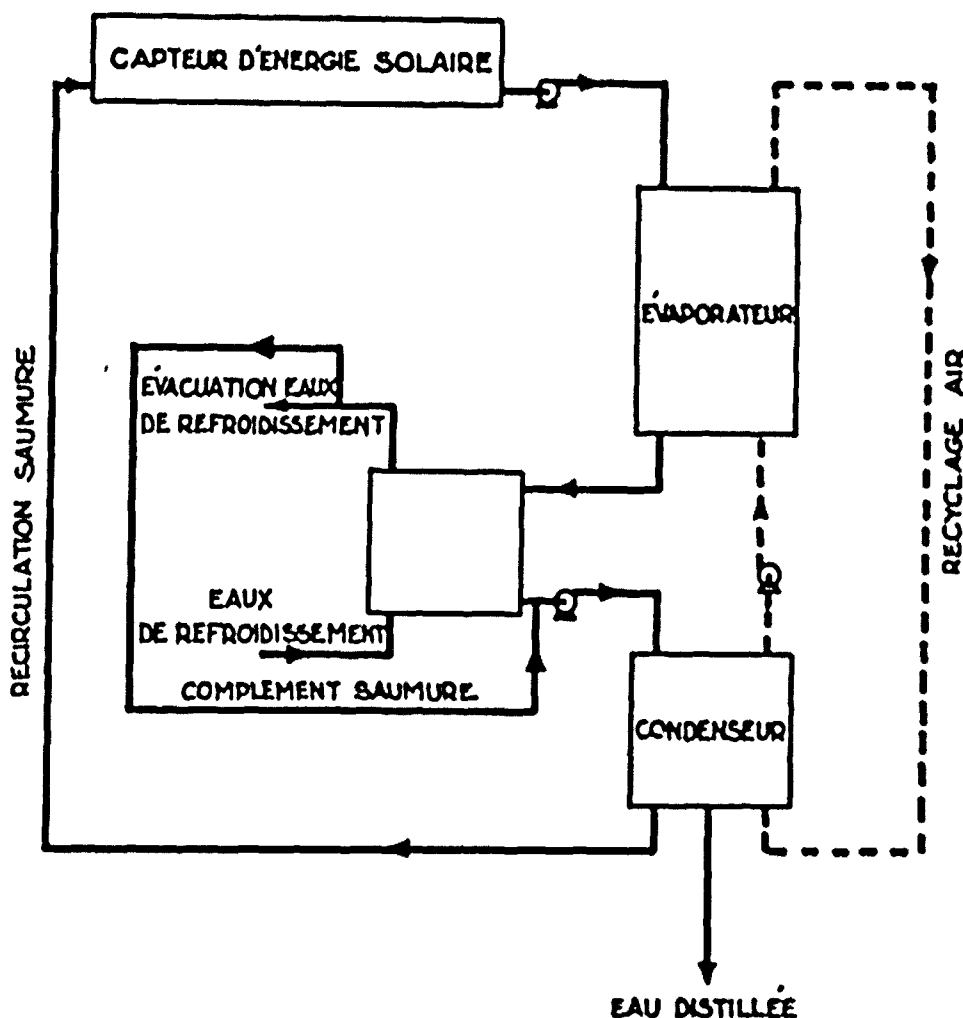


Figure 14. Grands distillateurs : nouveaux types

triel solaire et où les étages de chauffage évaporation, condensation, récupération des calories de condensation sont nettement séparés (figure 13).

Pour améliorer les coefficients de transmission de chaleur et de masse et pour parer aux faibles vitesses de convection naturelles aux températures considérées, le dispositif comprend à la fois une convection forcée de la vapeur, une recirculation des saumures, et une pulvérisation des saumures dans l'air à saturer.

Pour une insolation moyenne de l'ordre de 5 400 kcal/jour, les auteurs ont estimé la production d'eau distillée à 26,5 litres/m<sup>2</sup>/jour, soit 9,7 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/an par unité de surface de collecteur solaire utilisé pour le chauffage de l'eau.

Ces valeurs sont de 6 à 4 fois supérieures à celles de la production de verrières de petites dimensions et 7 à 13 fois supérieures à celles de la production de grandes verrières.

Pour une installation comportant 14 400 m<sup>2</sup> de collecteur, les auteurs estiment de 90 à 100 NF/m<sup>2</sup> de collecteur l'investissement total et déterminent

par le calcul un prix de revient du m<sup>3</sup> d'eau déminéralisée oscillant entre 1,00 et 1,25 NF/m<sup>3</sup>.

Hummel (5<sup>29</sup>) a élaboré un avant-projet d'un immense distillateur à chauffage, évaporation et condensation séparées (figure 14).

Le captage de l'énergie solaire se fait dans d'immenses bassins à lame d'eau mince protégés par une couverture transparente en film plastique, elle-même surmontée d'une deuxième couverture analogue. Entre les deux couvertures est injecté du gaz carbonique qui participe à la diminution des pertes par rayonnement. L'auteur considère que le dispositif de captage sera extrêmement efficace et affirme que la température de régime atteinte par l'eau sera de l'ordre de 100 °C (210 à 215 °F).

L'eau ainsi réchauffée est ensuite dirigée vers un évaporateur « flash » à quatre effets et des échangeurs de chaleur. L'eau distillée est finalement évacuée à une température voisine de 30 °C.

Cet avant-projet peut difficilement être analysé des points de vue thermodynamique et de l'engineering.

en raison du manque de détails dans le mémoire reçu. L'auteur aura certainement à répondre à des questions concernant aussi bien le schéma théorique, les conditions de captage de l'énergie solaire et de son utilisation dans l'évaporateur instantané, les modes de mise en œuvre des immenses surfaces de film plastique.

De toute façon, cet avant-projet constitue une illustration extrêmement suggestive et intéressante des difficultés auxquelles se heurteront le chercheur et l'ingénieur quand ils voudront, à très grande échelle, recycler l'énergie solaire et mettre en œuvre des matières plastiques en film.

Notons que l'auteur dans son étude économique estime pouvoir obtenir de l'eau distillée à un prix de revient de  $0,37 \text{ NF/m}^3$ .

On ne peut que souhaiter qu'une analyse plus complète de son avant-projet conduise à confirmer la possibilité d'une réalisation pratique. Le procédé de Hummel permettrait en effet d'atteindre d'emblée une zone de prix de revient acceptable pour l'alimentation en eau potable des agglomérations.

J. Hirschmann (S/23) présente un avant-projet appliquant les principes des machines thermiques fonctionnant entre de faibles différences de températures qui dans le passé ont été longuement étudiées par Georges Claude et Nizery pour la fourniture d'énergie et par Howe dans une perspective limitée à la production d'eau potable.

Dans cet avant projet, le captage de l'énergie solaire se fait au moyen d'un collecteur plat classique non distillant où l'eau saumâtre est portée de sa

température naturelle  $18^\circ\text{C}$  à  $70^\circ\text{C}$ ; ces valeurs constituent donc les valeurs extrêmes des températures des sources froide et chaude entre lesquelles doit fonctionner l'ensemble du système (voir figure 15).

Un calcul économique, qui ne figure pas dans le mémoire, estime à  $3,4 \text{ NF/m}^3$  le prix de l'eau distillée produite, en supposant par ailleurs que l'énergie électrique produite également par le dispositif serait vendue à  $1,7 \text{ NF/kWh}$ . Ces prix assez élevés sont, signale l'auteur, parfaitement acceptables à l'endroit où la construction de l'installation est envisagée.

Baum (S/119) considère que si l'on peut envisager la production de grandes quantités d'eau au moyen de distillateurs verrières de grandes dimensions, il est possible que d'autres méthodes soient mieux adaptées à une production à grande échelle.

Il considère que la question n'est pas encore mûre et nécessite des travaux et des réflexions approfondies complémentaires. Il remarque cependant que si l'on produit à l'aide de l'énergie solaire de la vapeur d'eau sous 2 à 3 atmosphères, on peut soit utiliser cette vapeur dans un distillateur multiples effets, soit au contraire produire de l'énergie électrique, elle-même employée à dessaler par électrodialyse.

La production en eau potable du distillateur multiples effets serait de l'ordre de  $100\,000 \text{ m}^3/\text{an}$  dans le cas où on utiliserait la chaudière solaire dont il a étudié antérieurement le projet.

Par contre, la production d'eau potable que permettrait une installation d'électrodialyse elle-même alimentée en énergie électrique par un turbo-

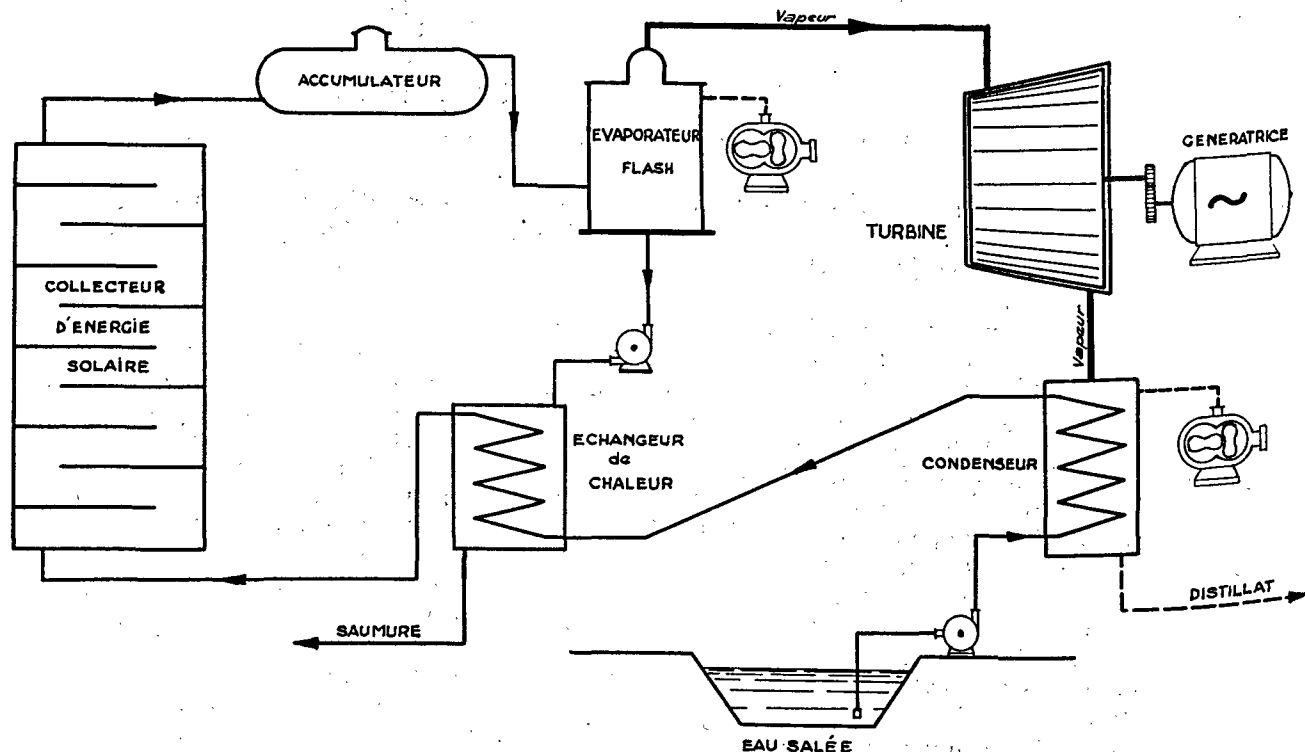


Figure 15. Distillateur à faible différence de température

alternateur mu par la vapeur issue de la chaudière est donnée dans le tableau ci-après :

Salure initiale de l'eau g/l	9	4,6	10	35
10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an	7	1,8	0,85	0,28

Baum ne donne pas malheureusement d'estimations de prix.

### Conclusions

De grands progrès ont été accomplis ces dernières années dans nos connaissances concernant les distillateurs solaires du type verrière. Nous savons maintenant quels sont les paramètres qui gouvernent leur fonctionnement, et nous connaissons les caractéristiques de construction qu'il y a lieu de rechercher.

Les possibilités de production unitaires de telles verrières sont limitées de 1,5 à 2 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/an.

L'augmentation des dimensions des verrières doit dans la généralité des cas conduire à une diminution de rendement.

Il ne paraît pas possible d'améliorer sensiblement le rendement des appareils par des perfectionnements constructifs.

L'effort ultérieur est donc à porter sur la diminution du prix de revient unitaire du distillateur, en tenant compte, bien entendu, de la longévité des matériaux et de la production unitaire escomptée.

Compte tenu des sujétions d'exploitation (main-d'œuvre) et de la faible production unitaire des distillateurs verrières simple effet, même un abaissement de prix unitaire considérable exigera toujours des installations de très grandes dimensions.

Pour que le prix unitaire de l'eau reste acceptable, la méthode de réalisation d'immenses surfaces couvertes d'une matière transparente et recouvrant une lame d'eau sur un sol étanche et thermiquement isolant doit être un des sujets principaux de préoccupations des chercheurs dans les années à venir. Il semblerait que l'utilisation de films plastiques spécialement traités (transparence, sélectivité spectrale, mouillabilité) constituerait une méthode fructueuse mais comportant pour l'instant un grand nombre d'inconnues.

La difficulté que l'on rencontre dans la réalisation des grandes surfaces mentionnées ci-dessus donne un intérêt particulier à deux voies de recherches :

a) Distillation multiples effets à partir d'eaux tièdes d'une température comprise entre 50 et 60 °C. Si un dispositif peu onéreux de construction et d'exploitation était mis au point, il permettrait de réduire sensiblement la dimension des surfaces de collecte de l'énergie solaire ou, réciproquement, d'autoriser des prix de revient unitaires plus élevés de ces surfaces.

b) Production d'eau distillée comme eau de condensation de turbines fonctionnant sous faibles différences de températures. La mise au point de telles machines, qui ont déjà fait l'objet de recherches antérieures, pourrait simplifier considérablement le problème du collecteur, qui constitue à l'heure

actuelle la pierre d'achoppement économique qui empêche l'emploi de la distillation solaire à grande échelle.

Le collecteur d'énergie solaire pourrait alors être simplement une lagune protégée contre l'évaporation par un film (film plastique, liquide, flottant, etc.). On peut également chercher à éviter le refroidissement de la lagune par des dispositifs anti-convection. Le prix de revient unitaire du collecteur relativement imparfait ainsi constitué pourrait être très faible, ce qui compenserait largement le mauvais rendement de la collecte de l'énergie solaire.

On peut également envisager la collecte de l'énergie solaire par l'air chaud.

Les différents spécialistes ne sont pas unanimes sur l'intérêt que pourrait présenter l'élévation de la température de collecte en vue de faciliter l'utilisation ultérieure de l'énergie solaire et son recyclage en particulier. Il serait intéressant que des études chiffrées pour de très grandes installations soient faites pour trancher la question. Il apparaît cependant que, pour de petites installations, un tel procédé doit être plus onéreux.

### ANNEXE

Lorsque l'eau est rare ou lorsque son prix de revient est élevé, une méthode consiste à diminuer les quantités d'eau nécessaires. C'est ce que proposent Trombe et Foëx en recommandant l'utilisation de cultures en régions arides sous serres distillantes.

Le microclimat ainsi réalisé sous certaines conditions d'exploitation et de rapport entre la surface insolée et la surface maintenue dans l'ombre permet de se rapprocher de celui de la forêt tropicale ou de la palmeraie saharienne.

L'eau nécessaire à la vie des plantes est produite par des distillateurs placés dans la partie supérieure de la serre. La quantité d'eau nécessaire est de très loin inférieure à celle exigée par l'irrigation à ciel ouvert.

La méthode en est encore au stade de l'étude et fait l'objet d'expérimentation systématique par les auteurs dans le sud de la France et par Gomella (S/107) à Touggourt au Sahara.

Les eaux produites par les distillateurs sont souvent imprégnées de goûts et d'odeurs peu agréables. Par ailleurs, elles sont trop faiblement minéralisées pour être ingérées d'une façon permanente sous un climat où la sudation humaine est abondante. Les eaux doivent donc être potabilisées. La lutte contre les goûts et odeurs ne présente aucune difficulté et la percolation sur charbon actif apporte généralement une correction parfaite. La reminéralisation des eaux peut se faire, soit en mélangeant aux eaux distillées une faible fraction des eaux chargées de sel (grandes installations), soit en faisant percoler les eaux distillées au travers d'un petit filtre chargé des éléments minéraux nécessaires (distillateurs domestiques).

Enfin, les distillateurs solaires n'échappent pas aux problèmes posés par les dépôts salins provenant des saumures soumises à évaporation. L'augmentation de l'épaisseur de lame d'eau permet, surtout dans le cas de l'eau de mer, d'éviter la sursaturation et les dépôts. Cependant l'augmentation de l'épaisseur de la lame d'eau n'est pas toujours souhaitable, comme nous l'avons vu plus haut. Par ailleurs, certaines eaux de nappes, même de salure moyenne (3 à 6 g/litre) peuvent être d'une composition ionique telle que les précipitations de gypse et de carbonate de calcium se produisent avec abondance. Il y a là un problème qui a été déjà discuté au cours des réunions antérieures et dont Lejeune (S/89) traite dans sa communication.

### Sujets de discussion proposés

1. Quelle est la meilleure forme à donner aux petits distillateurs solaires à usage domestique dans les zones arides?

2. Quelles sont les possibilités actuelles et les perspectives offertes par l'utilisation des matières plastiques pour les distillateurs solaires de grandes dimensions et pour ceux de petites dimensions, et quelles sont les propriétés des matières plastiques à rechercher pour les collecteurs d'énergie?

3. La production d'eau douce en grandes quantités par l'énergie solaire doit-elle être recherchée au moyen de distillateurs de grandes dimensions ou au moyen de collecteurs d'énergie distincts de l'appareillage utilisant l'énergie?

4. Quelles perspectives offrent respectivement pour la distillation solaire : *a*) un collecteur à haut rendement et haute température; *b*) un collecteur rustique à faible rendement et basse température?

## USE OF SOLAR ENERGY FOR THE PRODUCTION OF FRESH WATER

(Translation of the foregoing report)

Cyril Comella \*

(a) Solar energy is a short-wavelength radiant energy with its maximum intensity at 0.47 microns. No desalting method that could be seriously considered for use today or in the relatively near future makes direct use of radiant energy.

The use of solar energy for desalting thus implies its conversion, as the initial step, into: thermal energy, mechanical energy, or electrical energy, that is, into one of the three forms of energy utilized in the desalting methods that directly consume it. These methods are thermal stills (simple, multiple-effect, or instantaneous evaporation — "flash"), stills using pressurized steam, separation by freezing and electro dialysis.

The direct conversion of radiant energy into mechanical energy is not practically conceivable in the present state of the art, so that the production of mechanical energy from solar energy must pass through an intermediate stage of conversion into either electrical or thermal energy.

The direct conversion of radiant energy into electrical energy has made considerable progress, and conversion efficiencies of 10 to 20 per cent may now be considered as having been attained, or as on the verge of attainment.

These relatively high efficiencies assume the use of very pure substances, and the cost of such converters (1 000 NF/watt) is so high that they can find application only in highly specialized fields, which do not include the desalting of water.

Electric energy may be produced by passing through the stage of thermal energy. Semiconductor thermopiles have been very greatly improved during the last few years. The high cost of the equipment, however, precludes any idea of its use for a desalting plant. But some specialists believe that, at the mean temperatures obtained with selective flat collectors without concentrators, the efficiency of thermopiles ten years from now may be high enough to make the electric energy cost acceptable in non-industrial regions.

If this prediction comes true, we may expect to see combinations of the following kind put into service: selective flat collectors, thermocouples producing electric energy and a desalting plant employing electro dialysis.

\* Director, Société d'études pour le traitement et l'utilisation des eaux, Algiers.

Electric energy may of course be generated by a thermal machine as well. Desalting schemes involving the generation of electric energy in this way have up to now been generally rejected by experts. It should be noted, however, that Baum (S/119) considers such schemes to be possible and has undertaken a detailed study of their application to the desalting of brackish water (salinity under 10 000 ppm).

Radiant energy may be converted into thermal energy at the level of the energy collector itself. There are two principal types of such collector: flat collectors and concentrating collectors.

Considerable progress has been accomplished by using new materials and transparent or absorbing surfaces of low emissivity. Interesting research is going on at this very moment, in numerous localities, to improve the quality of these new materials, and, above all, to lower the production cost of low-emissivity selective surfaces.

Conversion temperatures close to 100°C are obtained with ordinary flat collectors. With total-radiation concentrators and a selective collector, 250 to 300°C is easily reached. Temperatures higher than this require more expensive and more delicate optical devices.

The production of high temperatures is not the only criterion of quality that must be applied to thermal converters. The emissivity, that is, the power of reradiating the energy received, increases very rapidly with temperature, and a flat collector at high temperatures reradiates, into the surroundings, a large part of the energy it has just absorbed, which cannot, thus, be actually utilized. We may thus speak of the absorption efficiency of a collector, which is the ratio of the energy actually available to the incident solar radiation.

In the case of an ordinary flat collector (black surface covered with a thin pane), the efficiency is of the order of 80 per cent at 30°C. It falls to 30 per cent in the neighbourhood of 90°C. A rise in the level of the conversion temperature, which facilitates the utilization of the thermal energy and improves the thermodynamic efficiency of the subsequent utilization operations, also leads to a serious loss of incident radiation, at the very level of the conversion collector.

Selective collectors contribute an efficient remedy by strongly reducing the reradiation losses at high temperatures.

The efficiency of a flat selective collector of this type will likewise be of the order of 80 per cent at 30°C and, in addition, it will remain in the neighbourhood of 65 per cent at 90°C, against only 30 per cent for the ordinary collector at this temperature.

As we have seen, the desalting of water by solar energy must be preceded by conversion of the radiant energy into thermal energy. The methods that have led in the past to practical realizations have directly applied this thermal energy to desalting, that is, they must be classified as "distillation" methods.

Similarly, most projects planned for the future are also distillers, except for several special cases, like that considered by Baum (S/119), or the scheme mentioned above.

The low density of the solar energy actually available at the ground level (800 watts/m<sup>2</sup>, or at most 4 to 6 kWh/m<sup>2</sup>/day) together with the conflicts between the following parameters—high efficiency of energy capture; high temperature of capture; low unit cost and simple design of collectors and facility and efficiency of subsequent utilization of available thermal energy—explain why the design and realization of the collector are among the major practical difficulties encountered in the use of solar energy for desalting water. This problem is not peculiar to the field of solar distillation, and if important progress is registered in the collection or conversion of solar energy, in one of the numerous other fields of application of solar energy, it may completely modify the present state of the art of solar demineralization as well.

### The stages through which solar distillation has passed

Excluding a few old studies which were due to intellectual curiosity rather than to any practical concern with the problem, the following stages may be distinguished:

First realization, by Harding in Chile, of a large glass-house type still in 1883 (23 tons/day for 4 800 m<sup>2</sup> area).

Around 1925-1928, a sudden revival of interest in solar distillation. The practical realization of solar stills was mainly in glass-house type installations built of wood and metal, and covered with window glass: Richard (Monaco); Ginestous (Paris and Tunis); Seltzer (Algiers); Veinberg (USSR); Trofimov (USSR).

At the same time, several workers concerned themselves with systems operating at higher temperatures or *in vacuo*: Pouget (Algiers); Abbot (United States); Trofimov (USSR).

These first attempts were examples of the synthetic experimental method; the equipment was first designed and constructed on the basis of general ideas without knowing the parameters in detail, and the results so obtained were then determined.

While in France and elsewhere the problem almost fell into oblivion after the initial surge of interest

from 1925 to 1930, some work was done in the USSR, especially by Tekuchev.

However, the intense activity in the development of solar stills, and the work in many countries, which has in a few years completely changed the scope and nature of our knowledge, came only with the Second World War, and, in still greater measure, during the immediate post-war period.

Interest now became general throughout the world, and it would be hard to name all the investigators who contributed to this collective, sustained effort, that still continues today, as will be seen from the number and high quality of the papers presented to this section of the Conference.

At first this new effort took the same form as in the 1925 period. A number of models were developed, varying widely in shape, nature and design, and very many materials were studied. But very rapidly, especially under the impetus given by the United States Office of Saline Water, and the USSR Krzhizhanovsky Heliochemical Laboratory, as well as the Hydraulic Service in Algeria, and the Common Organisation of the Saharan Regions, the studies assumed a more systematic character of searching for basic data, both by experiment and from theoretical consideration and calculation.

We thus find ourselves today at the threshold of a new stage of development of solar distillation, or, more generally speaking, of desalting by means of solar energy. The information and theoretical reasoning, taken together, now permit a preliminary detailed analysis of the problems that must be solved, and allow the determination, in this way, of the solutions to be adopted or the fundamental lines to be taken by subsequent research.

This Conference thus takes place at a turning point in the history of the problem. This is what gives it its great interest, and it would be indeed greatly to be desired that provisional conclusions, which might guide the collective effort during the years to come, could be rationally evolved, on the basis of unquestionable data.

### The present state of our knowledge

#### SMALL STILLS (figure 1)

Small stills have the function of meeting the drinking water requirements of isolated individuals or small groups, and special needs for small amounts (water for storage batteries in automobiles, or in telephone, radio or meteorological stations, for the dispensaries and pharmacies at small posts, engine water-cooling systems, etc.). These needs are limited to 3-15 litres per person per day, or to several litres, or, at most, several tens of litres, for the above special needs.

This is a field where solar distillation can be, and is now, of very greatly appreciated service from the purely human point of view, even if its general economic significance, on the scale of world or



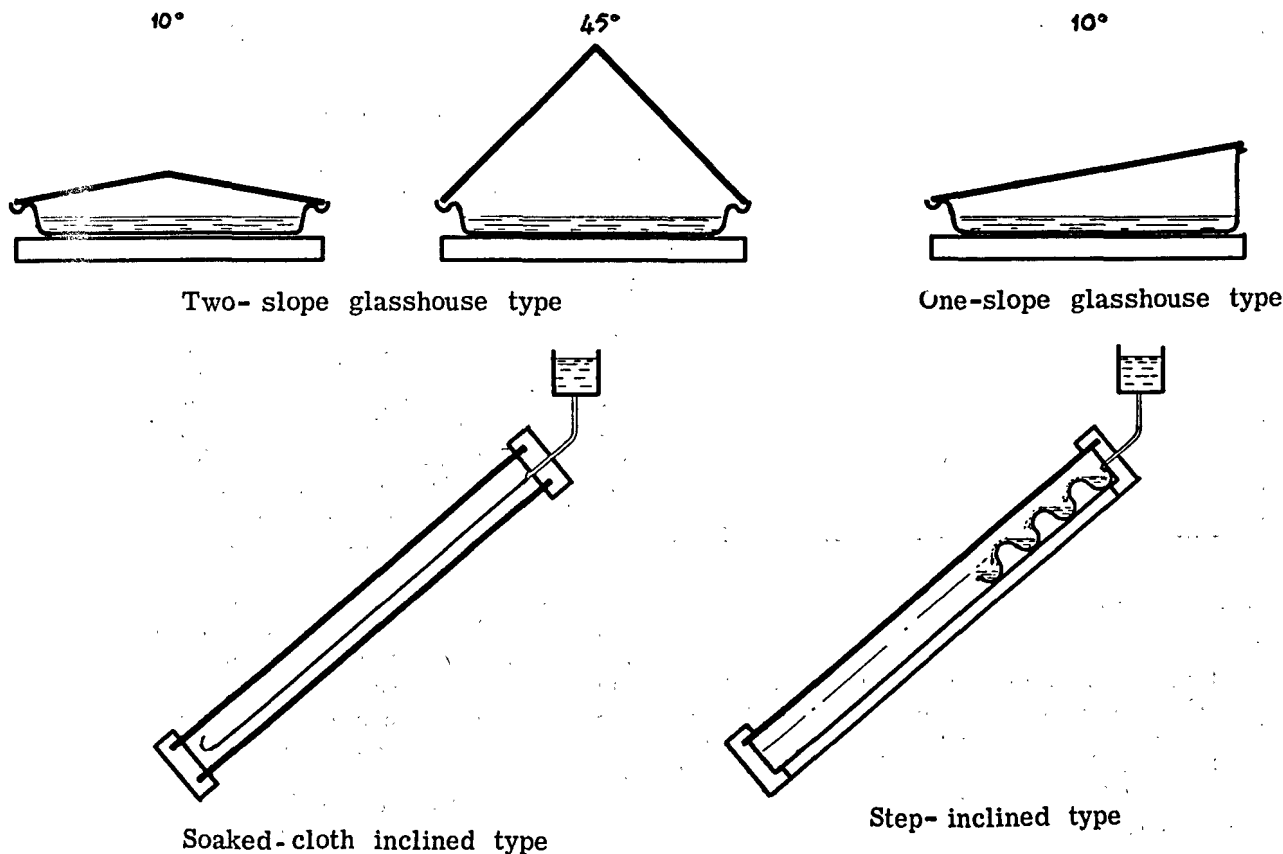


Figure 1. Small stills

national problems, is obviously not of primary importance.

The solar stills used for this purpose are of glass-house type, with horizontal tank, also termed roof-type solar stills or hot boxes; glass-house type with brine-soaked wick, or step-type tank, also termed tilted solar stills; stills with soaked surface.

Concentration stills with separate condensation of superheated steam have been less often proposed or developed for the production of small amounts of water. The condensation system of these stills may service as the point of departure for a multiple-effect still.

Glass-house type stills with a horizontal tank or wick have already been described in detail at many international congresses and conferences. Such descriptions will also be found in a number of papers published in the present section (Havez, S/63; Howe, S/29; Fontan and Barasoain, S/73; Gomella, S/107; Nebbia, S/113; Khanna and Mathur, S/115; Baum, S/119).

These are models with which we are now thoroughly familiar. Various experiments have been made on them; they are in service at various points of the world, and have been the object of thermodynamic balances and systematic experimental studies of their basic parameters (Howe, S/29; Gomella, S/107; Löf, S/17; Baum, S/119).

When designed in accordance with the rational rules that can be deduced from analysis and experiment, these devices may reach an efficiency of 70 per cent.

$$\left( \text{efficiency} = \frac{\text{unit energy of vaporization} \times \text{unit production}}{\text{unit radiant energy collected}} \right)$$

We may state that, as far as basic design is concerned, no further improvement in their principle can be made. The only path for progress that is still open — and progress here would be very desirable indeed — is the quest for better design, to reduce manufacturing costs.

The possible output of such a small still, designed with the greatest possible care, and following the rules defined by calculation and experiments, should be fairly close to an annual average of 6 litres/m<sup>2</sup>/day, in regions with a mean annual horizontal insolation of 5 500 kcal/m<sup>2</sup>/day (see figure 2).

But it must be borne in mind, as shown by experience, that in winter the output of even the best designed still falls substantially below the values recorded during the rest of the year. The inclination of the solar beams, increasing the reflection losses, the shorter duration of sunshine, which increases the relative importance of the heat lost during the morning "starting period", as well as other factors, lead to the adoption of lower values for the practical efficiency of solar stills, i.e., 60 to 50 per cent.

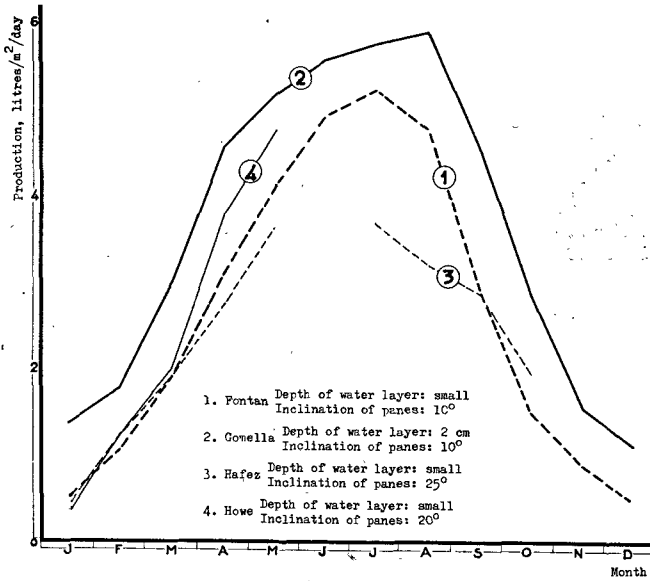


Figure 2. Distilled water production of various stills

Under these conditions, the production reasonably to be expected in regions where the use of solar stills can be considered is of the order of 1.5 to 2 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/year, that is, 4.1 to 5.35 litres/m<sup>2</sup>/day on the average, over the year.

The actual output is of the order of 7-8 litres/m<sup>2</sup>/day at the maximum in summer, and falls sometimes to 1 litre/m<sup>2</sup>/day, or even lower, for some winter days. These very great seasonal and daily variations seem to us to demand altogether particular emphasis.

We note also that a glass-house type still of any design will give an even lower average if it departs from the optimum rules of design.

The two principal designs of glass-house type stills, the horizontal tank type and the wick type, are sometimes contrasted. This is a mistake. They are two embodiments differing in detail, but based on the same principle. The criterion of choice should be the production cost of the distilled water.

There is, however, reason to agree with Baum (S/119) that the soaked wick still, inclined to the horizon, is better adapted for use at relatively high latitudes (30° to 40°), for a tilted collector favours the capture of a more radiant energy per unit collector surface than the horizontal arrangement necessary for stills with a free water surface.

The conclusion may consequently be drawn that wick stills are in principle better adapted to regions far from the equator and that, on the other hand, horizontal tank stills are better adapted to tropical or equatorial regions.

Nebbia (S/113) and Wilson have, however, sought to reconcile the free water surface with the vertical radiant-energy valve by building a still with vertical glass panes, in which the water for evaporation is placed in a series of superposed trays (figure 3). This type of still is particularly well adapted to

solar distillation in temperate, and even in polar, regions.

Some investigators have tried to separate the heating of the water in small stills from the subsequent condensation of the vapour formed. Two very different cases must be distinguished: non-concentration energy collectors, and collectors that also concentrate.

There are two fundamental obstacles in the former case:

First, the efficiency of selective flat collectors designed only to heat the water is lower than that of glass-house type distilling flat collectors (Baum, S/119, and Gomella, S/107). For the same water temperature, the radiation losses of the still are lower. Moreover, the heat removed by the condensing surface of the glass-house is, for the most part, more useful in the desalting process in contrast to the heat losses in the non-distilling hot-water type of solar energy collector.

The second obstacle is the low rate of transfer, unless forced convection is used, of the humid air from the interior of the evaporator to the interior of the separate condenser (Baum, S/119).

Since, in a glass-house type still, the condensing surface is entirely adequate to remove the heat, which may under certain operating conditions be excessive, a single-effect design, with a flat collector on the one hand and a separate condenser on the

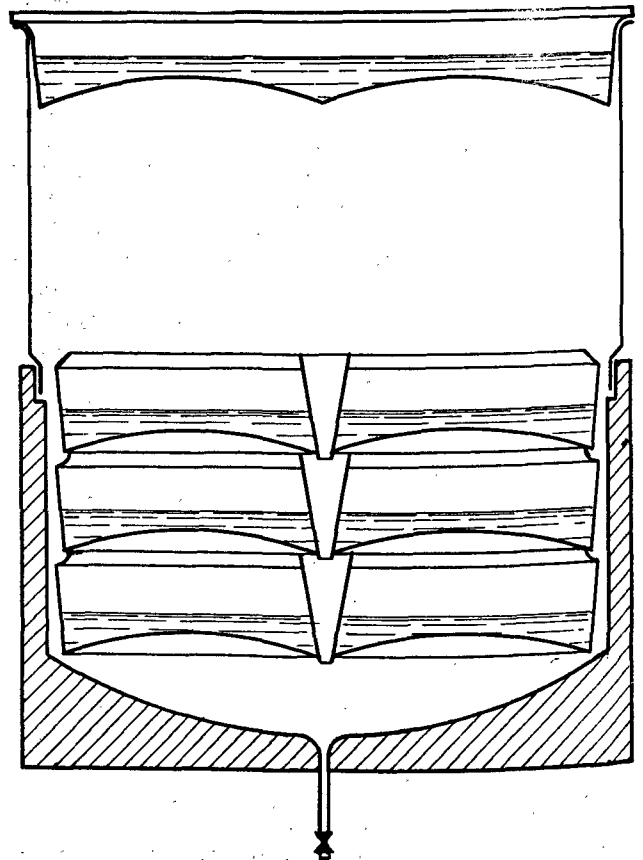


Figure 3. Multiple-effect still

other, must necessarily be more complicated, and more expensive, and would not fail to give a lower unit production for the same insolation, than a single-effect glass-house type still.

The separation of the processes of heating and condensation is thus inconceivable unless external energy is supplied for forced circulation or the steam is formed at a pressure sufficient to ensure natural transfer of the humid air.

The energy must also be collected at the same efficiency, or, better yet, a higher efficiency than in the case of ordinary flat or selective collectors.

The use of flat selective collectors with an outer surface of low emissivity may be envisaged for heating feed water to around 100°C. The application of such a scheme to the distillation of brackish water has not been reported to us.

High temperatures may also be obtained by focusing systems (figure 4). The construction of reflecting mirrors, which has long been considered a delicate and expensive task, may now be undertaken by a simpler method, if reflecting plastics are used, since, in the case of water heating, a moderately good optical quality is sufficient.

It would likewise appear that the use of cylindro-parabolic reflectors with tubular boilers located along the focus would considerably simplify the operation of the focusing system and, in particular, would make the use of a heliostat unnecessary or, if no heliostat is originally provided, would avoid the numerous daily readjustments of the reflector position that would otherwise be required.

Among the embodiments or plans described, we may cite Veinberg (1939), who produced 23 litres/day with a parabolic mirror 2.42 m<sup>2</sup> in area and a multi-stage condenser and Baum (S/119), who discusses in detail the possible output of multiple-effect stills as related to reflector shape and optical quality, and to the number of stages of distillation.

It may be held that to be useful for this purpose, a cylindro-parabolic mirror must have been built with a certain amount of care (a minimum concentration factor of 30) and that the possible unit production in this case, for each of five stages, is from 2 to

2.2 litres/hr/m<sup>2</sup> of mirror surface, or a seasonal average of 20 to 25 litres/day/m<sup>2</sup>.

If we consider the entire body of knowledge accumulated up to now, we find that the equipment for small solar stills will be single-effect, with the glass-house effect or multiple-effect, with a concentration system; that the principal criteria of quality for single-effect glass-house type stills are well known today (high operating temperature, low thermal storage (shallow water layer), short distance between evaporator and condenser, faintest possible shadow on the evaporating surface) and that, for stills meeting these conditions, we can predict a unit production of 1.5 to 2 m<sup>3</sup>/year/m<sup>2</sup> of flat collector surface, with wide daily and seasonal fluctuations.

We also find that concentration stills, for which the experience has been less extensive, may nevertheless be calculated rather exactly, and that their unit production may be estimated at 3 to 5 times that of glass-house stills, or 4.5 to 10 m<sup>3</sup>/year/m<sup>2</sup> of reflector surface; that the materials used in still construction will be subject to very severe service conditions (corrosion, scaling, deformation due to humidity, deformation due to desiccation, deformation due to the great range of temperature, erosion by the wind, action of atmospheric agents, aging under the action of actinic radiation).

The materials must possess good resistance to these aggressive agents, for, depending on the particular parts involved, the transparency, the impermeability to water and air, the absence of adhesive failure or joint separation and the maintenance of superficial flatness, may all have a considerable effect on the practical efficiency of the still.

The designer and user have a choice between the various types of stills and materials.

The choice between the various types of stills depends on a number of factors: whether the installation is fixed or mobile, the geographic location, whether use is continuous or periodic, whether or not coolant water is available, the qualifications of the available labour, and the importance of the factor "unit cost of water".

A mobile installation cannot use the conventional rigid-tank still. A plastic-film, soaked-wick, Bjorksten-type still, or the inflatable spheroidal still used on United States Navy life rafts, would be more convenient for such use.

Similarly, concentration stills would be available for use on a heavy track provided the reflecting mirrors could be folded.

The geographic location may make horizontal stills preferable near the equator, and soaked-wick stills at higher latitudes. Concentration stills are used at all latitudes.

For continuous use, stills that do not need repeated reorientation are preferable (glass-house type stills).

The lack of readily accessible coolant water would prevent the use of separate-condensation stills.

The qualifications of the available labour may in some cases make it necessary to use stills of simplest

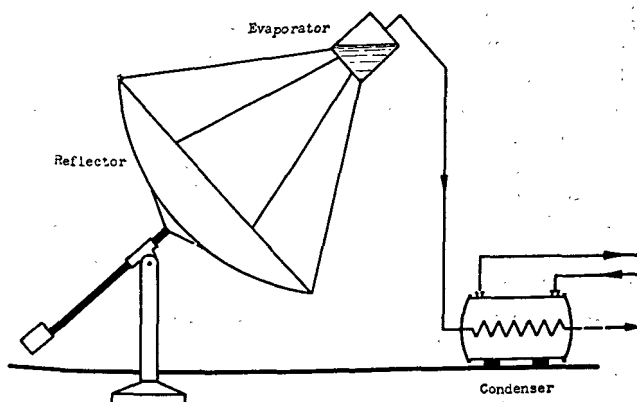


Figure 4. Small stills

design and operating technique (horizontal-tank glass-house stills).

Finally, the factor "unit cost of water" will be basic for fixed plants, essentially designed to serve inhabited localities, where the demand for water is greater, and where production cost is extremely important. For mobile equipment, on the other hand, the factor of "convenient use after change of location" is of greatest importance.

The choice between the various glass-house stills will often be determined by the unit cost of water, which depends on the unit cost of the equipment and on its service life.

Several authors have in the past suggested very low unit construction costs for small stills. It is quite certain, in particular, that a soaked-wick still with transparent plastic cover can be produced at relatively low unit cost by mass-production methods. No definitive information on the construction cost and service life of plastic-film stills is as yet available. For small glass-house stills, using long-lived materials (asbestos-cement-glass or polyester-glass sandwich), the unit cost ranges from 72 to 145 NF/m<sup>2</sup>.

These costs can certainly be decreased substantially for large-scale production, and costs of the order of 50 to 100 NF/m<sup>2</sup> are not at all absurd.

A service life of 20 years can very well be assumed, which, under the further assumption of unit production of 1.5 to 2 m<sup>3</sup>/year/m<sup>2</sup>, would give water production costs of the order of: 1.25 to 3.33 NF/m<sup>3</sup> if the equipment is operated and maintained by unpaid family labour.

It is a far cry from these figures to any that could possibly have been estimated in the past. I believe them to be close to reality for the smallest stills, and for reflector surfaces up to several tens of square metres.

If we consider the lower estimate, 1.25 NF/m<sup>2</sup>, it is no more than two or three times the cost incurred by certain city drinking water systems. Applied to the distillation of seawater, it is entirely competitive with the cost of the conventional methods. It must, however, be noted that this estimate, in my opinion, is very optimistic, even under the assumption of very large-scale production of small stills. As things are at present, the real cost of solar distilled water in small plants probably ranges between the following two levels: 5 to 10 NF/m<sup>3</sup>, according to location and equipment.

I have no information on the cost of water distilled by multiple-effect concentration plants. Allowing for their capacity, which is 3 to 5 times as great as those of glass-house type horizontal tank stills, we may conclude that the cost price of the complete plant, per square metre of mirror surface, must be of the order of: 200 to 725 NF/m<sup>2</sup> to be competitive with glass-house type stills, or 150 to 500 NF/m<sup>2</sup> to be competitive with glass-house type stills manufactured in large series.

This is an objective which seems very difficult to reach, above all for the lower estimates. Thus it would seem that the use of concentrating stills of small size cannot be envisaged, except in certain cases, in which, in view of the factor of convenience, considerations of cost are excluded.

What then are the prospects in the field of small stills? Very frankly, it must be recognized that we have been marking time these last few years. It is a question of production cost.

The use of conventional materials burdens the cost price with a labour cost for fabrication and only very large-scale production could decrease this labour cost appreciably.

Moreover, the volume and the weight of the rigid stills impose a heavy burden on the installed cost at the site of use, and this is a point which should not be neglected, for large-scale production is in fact opposed to the building of the equipment on site.

We note, however, that there is a method of attacking the problem of equipment cost, which is to conceal the true cost by including it voluntarily in the general expense of town-planning or housing and amenity costs.

It should be considered, on the other hand, that a square metre of solar still of conventional glass-house type can provide the drinking water required by a single person, and that, on the other hand, the cost of this square metre, even at present levels of housing construction costs, is comparable to that of a square metre of very primitive housing facilities, and far less than that of a square metre of a non-luxury dwelling.

Under these conditions, it might well be asked whether solar energy could not be utilized, even today, if the capital investment in housing were merely increased by an amount corresponding to the cost of a fraction of a square metre of additional dwelling space per occupant, or even of a whole square metre, by providing new housing with individual solar stills located on the roofs.

The action of detergents, which permit the use of hard water, brackish water, or even seawater, for washing and cleaning, permits us seriously to envisage the distribution of filtered and sterilized, but not demineralized water, in the public water systems of new cities, with each building separately producing the wholesome and potable drinking water required by its occupants.

For the future, a lowering of construction cost may certainly come from the use of plastics.

In the present state of the art, plastics have three different disadvantages: a cost that is still high, non-wettability, rapid aging with time and under the action of atmospheric agents, especially ultraviolet radiation.

On the other hand, they have certain great advantages: light weight, non-fragility, ease of installation.

If we consider the substantial progress in the last few years in eliminating these three principal disadvantages, we may be firmly optimistic and hope

to reach a cost level, allowing for service life, very much lower than it is today.

#### METHODS OF APPROACH TO THE DEVELOPMENT OF LARGE STILLS

In designing a large still, one may either extrapolate the dimensions of a small still or seek to design a plant that is derived from it but differs in certain parts, or one may also use entirely different arrangements, employing non-solar external energy as auxiliary energy to ensure mass transfer of water or steam, etc.

A method pointed out by Gomella in 1957 as entirely admissible in principle, which has now been taken up again by Howe (S/29), consists of realizing large distillation surfaces by juxtaposition of a large number of small stills.

#### LARGE GLASS-HOUSE STILL

For the last few years it has been claimed that a glass-house type still with a large water surface, constructed like other public works, would supply water at much lower cost than small stills.

This question was raised in particular at the Washington Symposium (1957), at the Mont-Louis Colloquium (1958) and at the Cleveland Symposium (1960).

Our ideas today have been greatly clarified, owing to the systematic experimentation and calculation by several investigators, which are, in some respects, mentioned in papers presented to this Conference (Strobel, S/85; Howe, S/29; Gomella, S/107; Löf, S/77; Baum, S/119).

Earlier publications, such as those of J. M. Blocmer, N. A. Collins, J. A. Eibling, Maria Telkes, B. W. Wilson and others, have likewise made fundamental contributions to our understanding of the operation of glass-house stills.

Under these conditions, it is now possible to predict the results of increasing the dimensions of a glass-house still.

Three papers are of considerable interest in this connexion (Löf, S/77; Baum, S/119; Gomella, S/107). They give precise conclusions and numerical data permitting comparison between work done at widely separated localities, by investigators not in direct

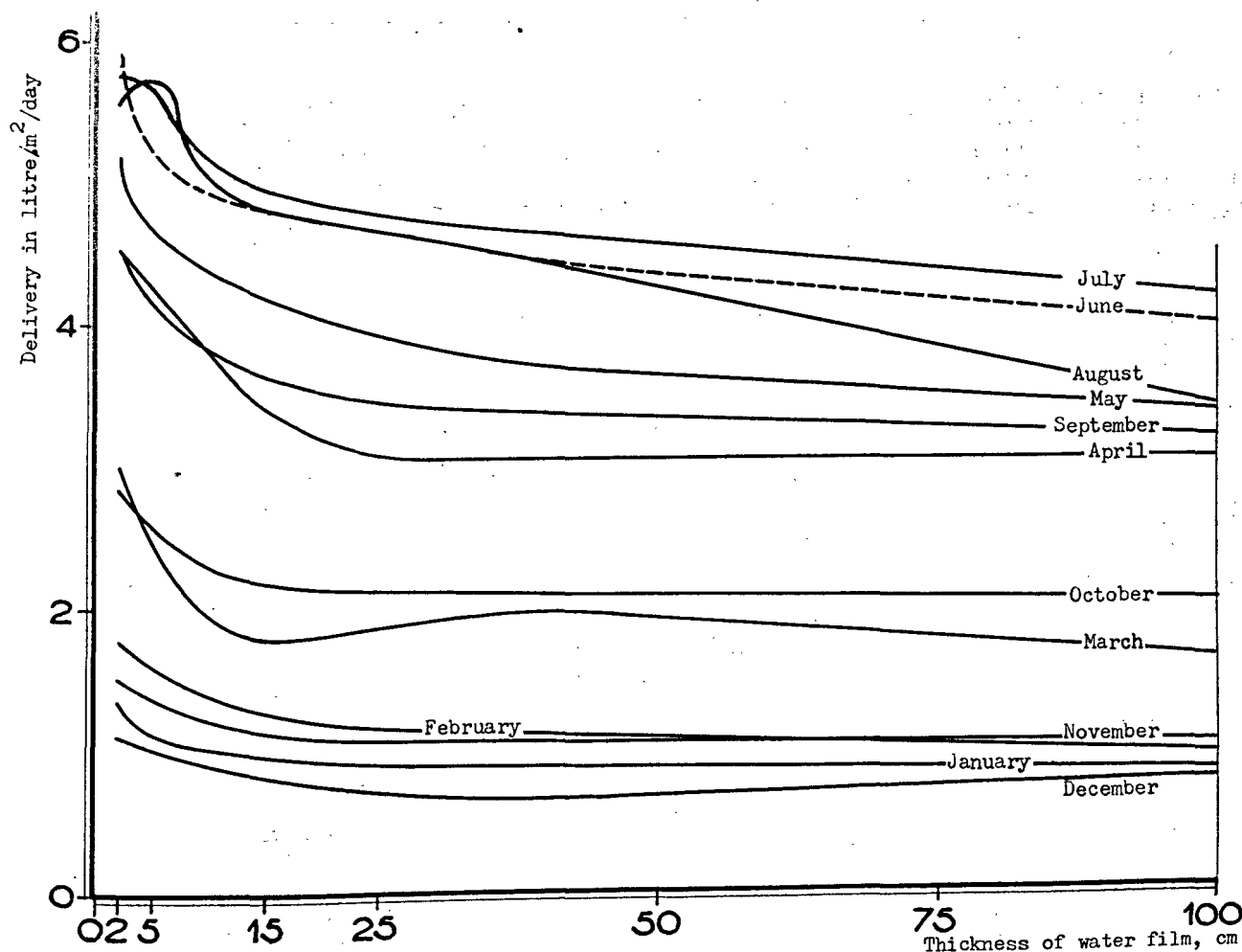


Figure 5. Thickness of water film versus daily output

contact with each other, following different experimental procedures.

Baum (S/119) arrives at his conclusions by calculation starting out from basic data provided by a shallow-layer glass-house still.

Löf (S/77) likewise draws his conclusions from calculation. On the basis of data from a deep-layer glass-house still on a day in the month of May, he calculates the operation of a glass-house still with a water layer of thickness zero. Then, from these basic equations, he calculates the changes that would

result from allowing for thermal storage for water layers of varying depth (figure 5).

Gomella (S/107) made a systematic experimental study of glass-house stills in parallel operation, with all conditions identical except for a single parameter, which was varied.

Then he determined the experimental conditions statistically corresponding to the group of observations made.

The first noteworthy fact is the qualitative agreement of the conclusions of these three papers:

Factor	Is this factor favourable to increased production?		
	Löf	Baum	Gomella
Increased solar radiation . . . . .	Yes	Yes	Yes
Increased atmospheric temperature . .	Yes	Yes	Not mentioned
Small water-glass temperature difference . . . . .	Yes	Not mentioned	Yes
Low coefficients of reflection and absorption of glass . . . . .	Yes	Yes	Not mentioned
Elevated temperature of water . . . .	Yes	Yes	Yes
Shallow water layer, smallest possible thermal storage . . . . .	Yes	Yes, implicitly	Yes
Small water-glass surface ratio . . . .	Yes		Yes
Short water-glass distance . . . . .	Not mentioned	Not mentioned	Yes
Gentle breeze . . . . .	Yes	Not mentioned	Not mentioned

+ Yes for  $T > 60^{\circ}\text{C}$  < 1 for  $T < 50^{\circ}\text{C}$ .

The numerical values are likewise rather close together (figures 6 and 7), and sometimes in marked agreement. It should be noted that the results of direct experiment are always slightly below the numerical values based on the theoretical calculations.

It appears, in particular, that the L. I. calculation gives appreciably more optimistic results than Baum, and that Baum, in turn, gives numerical values slightly higher than those resulting from Gomella's experimental formulas, based on systematic observation of Saharan stills in parallel operation.

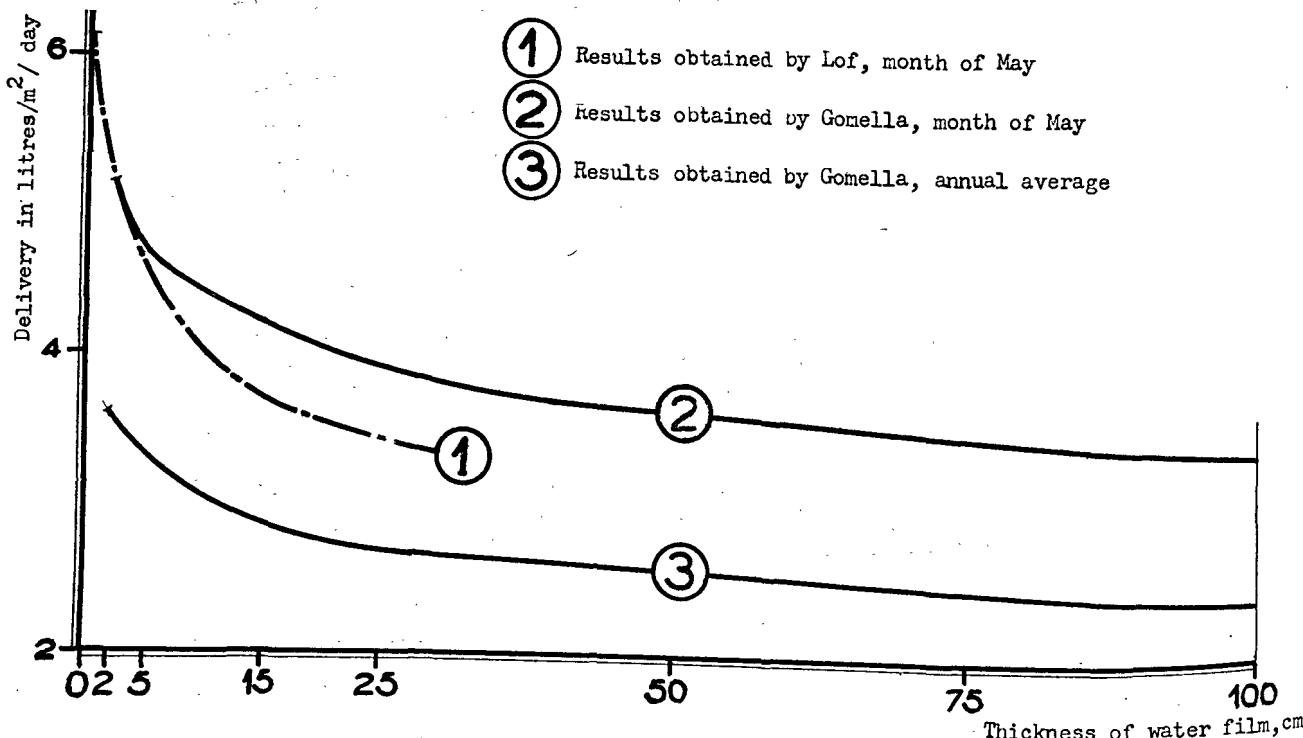


Figure 6. Thickness of water film versus daily production

It should, however, be noted that the stills of the Gomella experiments were derived, from high-efficiency equipment built in the Sahara for practical use, with certain slight modifications for experimental convenience.

For instance, the experimental still with a water layer 2 cm deep had an average unit production 15 per cent lower than the non-experimental still with a water layer of the same depth.

This fact makes the agreement with the Baum calculation absolutely remarkable, above all if we remember that the temperature of Gomella's brackish water was lower (15°C against 20 to 30°C), and that his volume preheated before evaporation was 2 to 3 times as great as Baum's.

The results calculated by Löf and those observed by Gomella are likewise in very good agreement if the respective values are compared :

Unit production as a function of film thickness.  
Per cent of unit production at water depth 0 cm

Depth, cm	Löf	Gomella
0 . . . . .	100 per cent	100 per cent
2 . . . . .	86	80
5 . . . . .	76	74.5
15 . . . . .	60.5	63.5
40 . . . . .	54	58.5
100 . . . . .	—	53

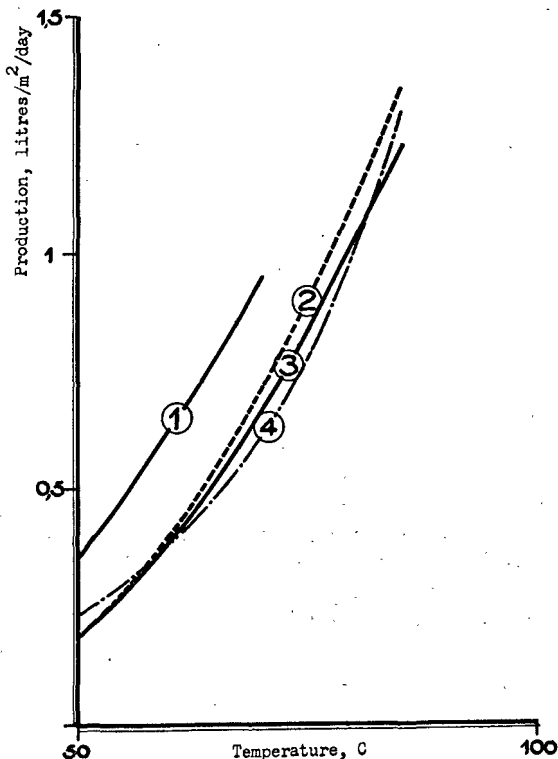
As indicated by Löf, Strobel, Baum and Gomella, a large glass-house still, at the same radiation intensity, necessarily operates at lower temperatures than a small still. If we examine the various embodiments proposed, we can estimate that the initial unit production of these large glass-house stills will be of the order of 70 to 50 per cent of the values found for the small stills.

The large glass-house stills will thus produce, according to their particular type and the locality, 0.75 to 1.4 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/year.

These basic data, which have now been established by calculation and confirmed by experience, permit us to judge the interest that would reside in the construction of a very large glass-house still.

For this technique to be preferable to that of the juxtaposition of small stills manufactured in large series, the unit cost of construction of the large glass-house would still have to be substantially less than half the unit cost of a small still.

These data also permit us to determine the construction cost plus square metre of large glass-house stills, allowing for the service life of the materials used and for the operating and maintenance cost, so that the use of solar distilled water might be envisaged in the future, for supplying a city with drinking water and irrigation; at present, for competing with the other methods of demineralization in cases where they are now used in spite of the rather high cost of treatment (thermal distillation, electrodialysis, freezing).



- ① LÖF Thickness of water layer = 0cm
- ② BAUM Volume of feed water = volume of distilled water
- ③ BAUM Volume of feed water = twice the volume of distilled water
- ④ GOMELLA Volume of feed water = twice the volume of distilled water

Figure 7. Water temperature versus daily production

To be satisfactory for use, the cost of demineralization must not exceed a certain level.

According to the utilization envisaged, we have adopted the following complementary costs as acceptable :

- 0.02 to 0.05 NF/m<sup>3</sup> for irrigation water,
- 0.15 to 0.50 NF/m<sup>3</sup> for city drinking water,
- 2.00 NF/m<sup>3</sup> for the demineralization of brackish water, under present conditions,
- 5.00 NF/m<sup>3</sup> for the demineralization of seawater, under present conditions.

The production cost of water produced by a solar glass-house still is very different according to whether the cost of the required labour is or is not taken into account.

*Small installation without paid operating labour.*  
The solar glass-house still, to be able to compete with present desalting methods, would have to cost not more than :

- 50 to 100 NF/m<sup>2</sup> for treatment of seawater,
- 20 to 40 NF/m<sup>2</sup> for treatment of brackish water.

Treatment capacity		Maximum production cost admissible			
		Present production		Future production	
m <sup>3</sup> /year	m <sup>3</sup> /day	Sea water	Demineralization of Brackish water	City drinking water	Irrigation water
10,000 . . . . .	27	18 to 36 NF	Impossible	Impossible	Impossible
100,000 . . . . .	270	44 to 97 NF	14 to 27 NF	Impossible	Impossible
1 million . . . . .	2 700	50 to 100 NF	20 to 40 NF	0.9 to 9 NF	Impossible
5 million . . . . .	13 500	do	do	1.4 to 10 NF	0.8 to 0.80 NF
10 million . . . . .	27 000	do	do	do	0.14 to 0.90 NF

*Large plants with paid operating labour.* The conclusions to be drawn from these figures are very clear.

In the first stage, to be able merely to compete with the other means of desalting to supply drinking water of water for industrial use at a cost which is still high but acceptable, the installed cost of a glass-house solar still per square metre would have to run between 20 to 100 NF according to the size of the plant, the nature of the water treated, the insolation conditions, etc.

In the second stage, to be able to envisage the large-scale supply of drinking water to agglomerations, this cost would have to fall to 1 to 10 NF,

this method not, of course, being economically applicable except for large-scale plants (several thousand m<sup>3</sup>/day).

The third stage, that of supplying irrigation water, appears to be quite impossible unless methods of terracing the soil and making it impermeable to water are discovered, together with long-lived transparent materials, at a production cost that cannot even be envisaged today nor for the next few years.

The objectives stating production cost being determined, it is now of interest to consider the actual or estimated costs of construction today for large-scale glass-house stills (figure 8).

Author	Materials	Size, m <sup>2</sup>	Cost, NF/m <sup>2</sup>
Strobel and Löf . . . . .	Concrete and glass	230	280 to 380
Strobel and Löf . . . . .	Asphalt and glass	100 000	74
		100 000	72
		100 000	61
Gomella . . . . .	Concrete and glass	10 000	100 to 80
	Asphalt and glass	10 000	65 to 50
Strobel - Löf and Edlin	Plastic film (figure 9)	225	?
		100 000	?

Thus we are now in the stage at which we may envisage competition between distillation using large glass-house stills and other desalting methods, above all where highly saline water is to be treated, for instance sea water, and provided the plants in question are large: 10,000 m<sup>2</sup> at least.

We are therefore still very far from the stage at which we can envisage the supply of public drinking water systems of agglomerations by this means, under acceptable economic conditions. To get there, the production cost would have to be decreased by a factor of 10 to 7.

The question whether such a decrease is possible remains for discussion. All that can be said is that the method to be followed to attain this aim is not obvious, especially with the traditional materials.

It would be interesting to know the viewpoint of industrialists and investigators in the field of plastic film. Will the advances made in the last few years continue at the same rate? If the answer is in the affirmative, the most promising way for

large scale glass-house stills will be the way leading to the general use of plastic film in their construction.

#### JUXTAPOSITION OF SMALL STILLS

The realization of very large distilling surfaces is possible if a large number of small stills are juxtaposed.

The problems of collecting the distilled water, of distributing the feed water, and of removing the concentrated brines are all technologically simple and can be solved at low cost.

Under present conditions, however, the lowest cost that one can hope to reach for such an embodiment has been estimated above at 50 to 100 NF/m<sup>2</sup>.

This is a cost level very similar to that of large glass-house stills of asphalt and glass, and the choice between these two types of construction will depend on each specific case.

We may note, however, that the operation of a mosaic of small stills will probably involve a higher



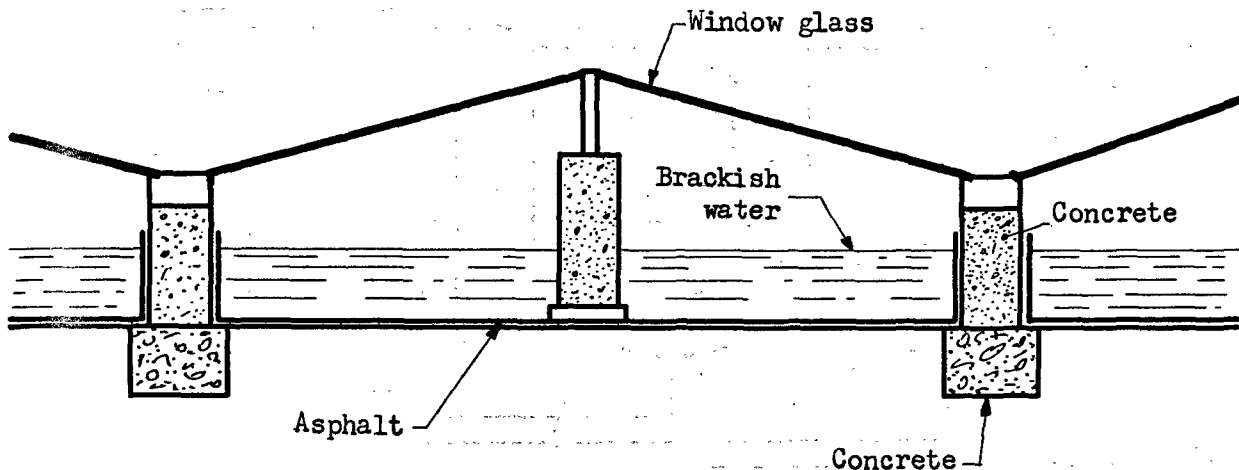


Figure 8. Large stills

labour cost than the operation of a group of large unit surface. The juxtaposition of small stills will therefore be better adapted to smaller surfaces, and to regions where labour costs are lowest.

It should be noted that Howe (S/29) estimates that a mosaic of inclined stills, arranged on grounds terraced in grand masses, would cost considerably less per installed square metre and would produce water at a lower cost per cubic metre than of a Löff type concrete-glass still (S/77). We also note, however, that Howe has not made a comparison with the very large asphalt-glass still derived from the Löff experimental plant:

OTHER METHODS OF LARGE-SCALE DISTILLATION

Glass-house stills are single-effect thermal devices. In the conventional technique of industrial distillation, one seeks, in order to improve the energetic

efficiency, to recycle the energy, on the one hand, and, on the other, in each stage of utilization, to improve the efficiency of the utilization of energy. It is natural that investigators should attempt to apply these methods of improvement to solar distillation.

The successive stages of a multiple-effect still (figure 10) operate at lower and lower pressures. It is thus appropriate either to start from a higher initial temperature, which requires concentration collectors or flat selective collectors, or to provide auxiliary means to ensure the accelerated transfer of the vapour masses and provide increasing degrees of partial vacuum.

The difficulty encountered by these investigators will be to obtain equipment meeting these requirements; yet simple and inexpensive. The increase in water production cost due to the increased cost

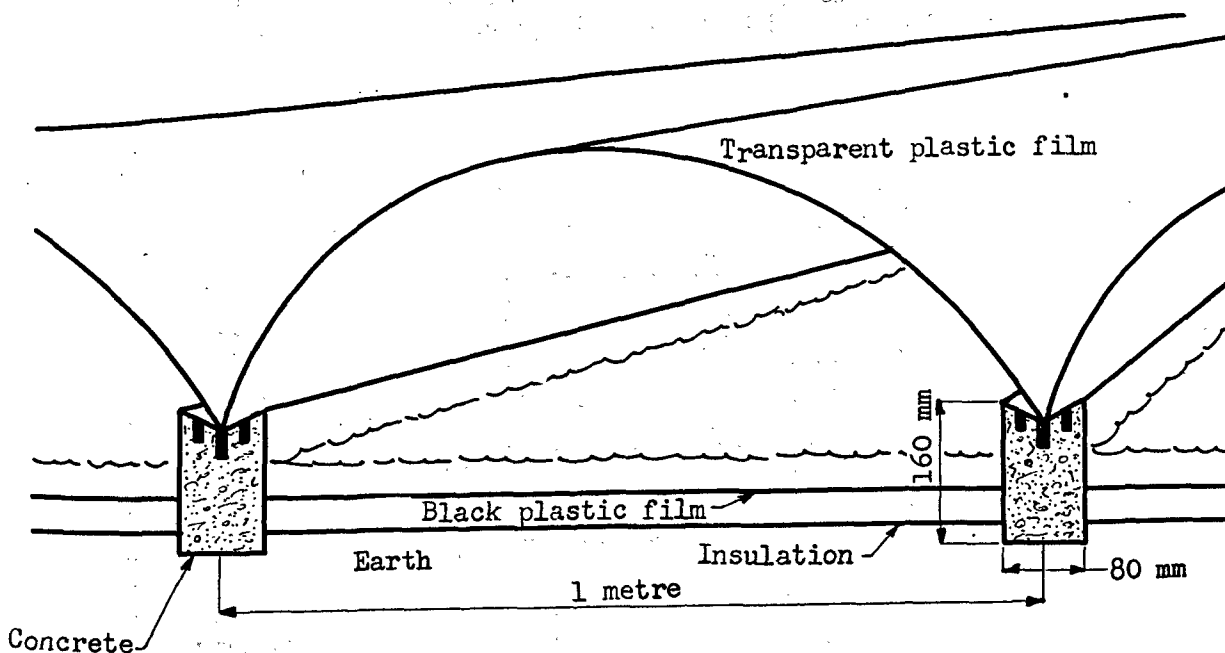


Figure 9. Large distillers. Plastic still

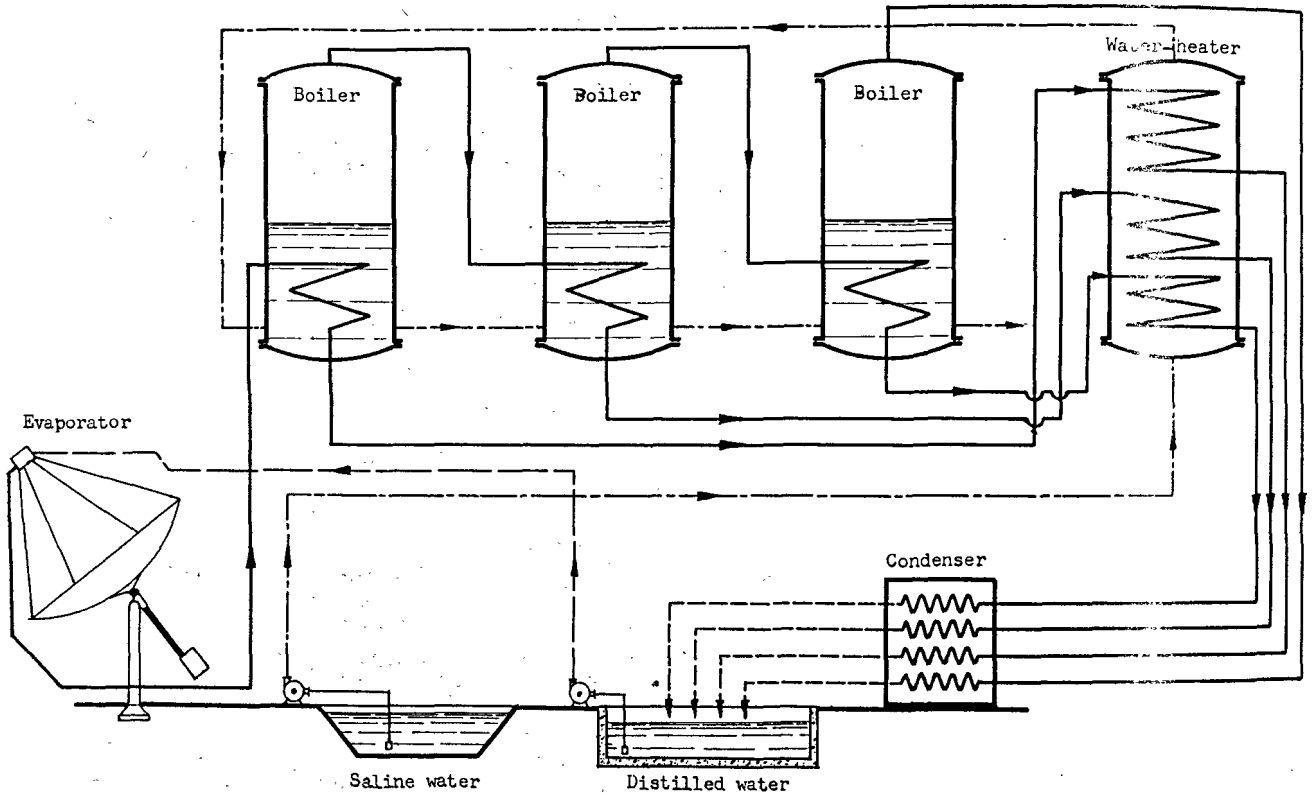


Figure 10. Large stills. Multiple-effect plant

of the apparatus, and to the burdensome conditions of operation and maintenance must not, in the last analysis, exceed the increase in production per unit collector surface.

In thermal installations in general, one of the most important factors controlling the efficiency of utilization of thermal energy is the group of coefficients of heat transfer and of mass transfer.

In the present state of our knowledge, transfer coefficients may be increased by using highly con-

ductive walls, subjecting the fluids in contact with the walls to the hydraulic conditions of turbulent flow, obtaining the thinnest possible liquid film in cases where a liquid film separates the vapour from the wall, subjecting the liquid films to the conditions of turbulent flow and impress a high velocity on the vapour, seeking the formation of condensation in drops, and taking the greatest possible care to avoid the formation of low-conductivity granules (scale or corrosive granulation).

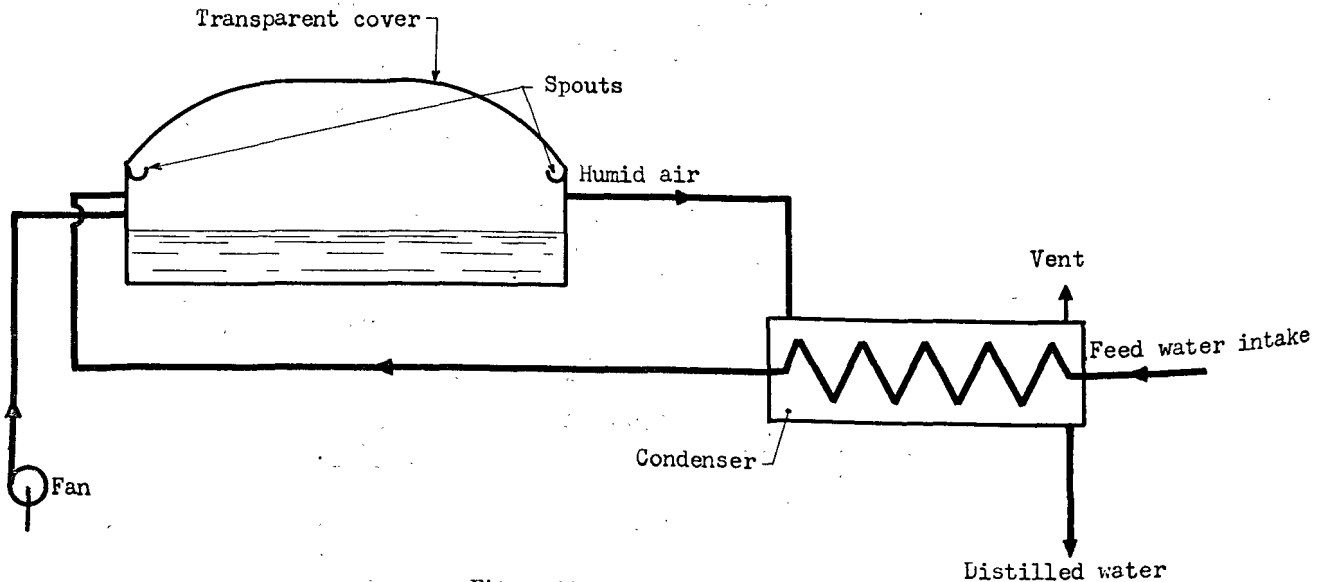


Figure 11. Large stills. New types

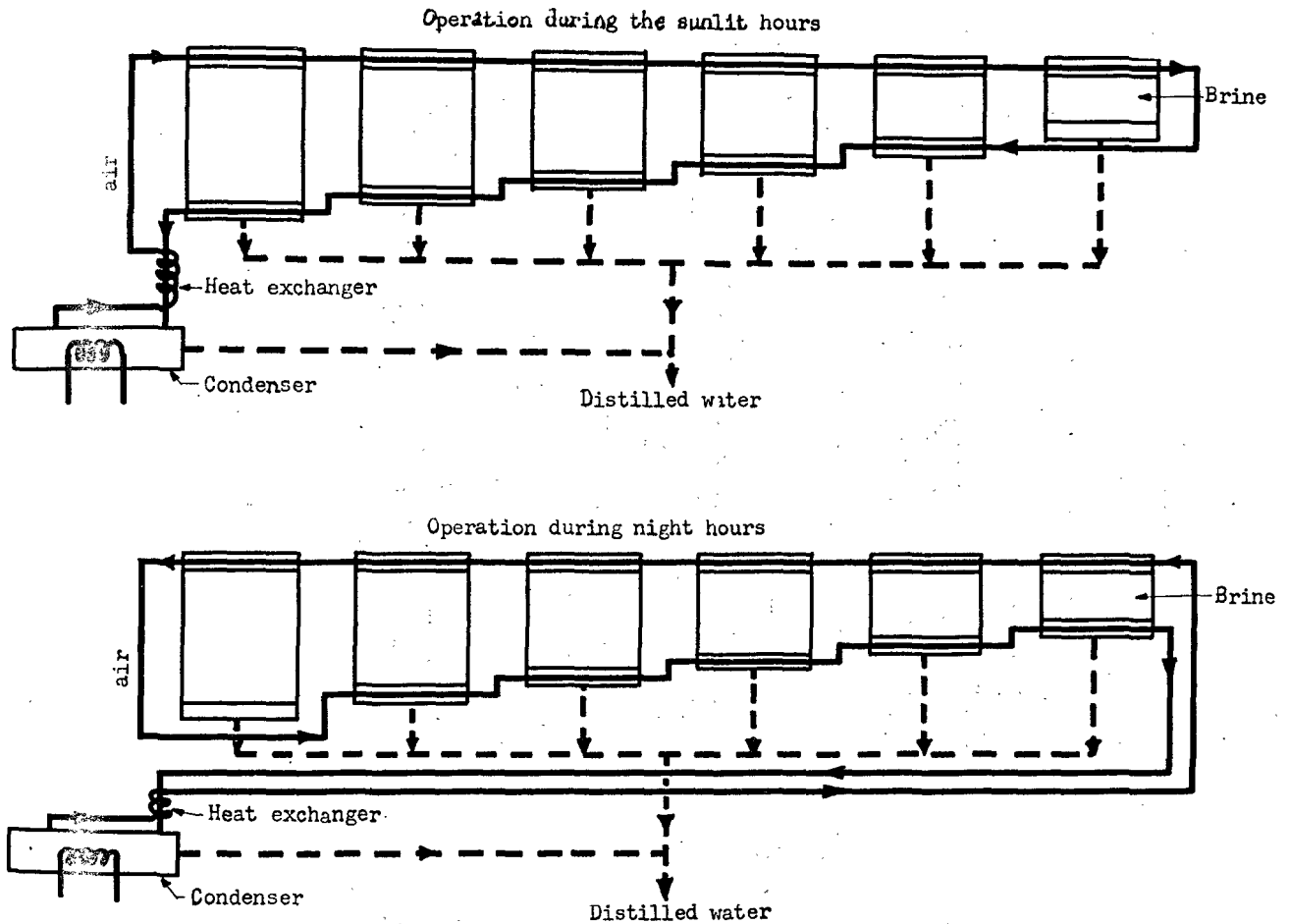


Figure 12. Large stills of new types

Grune, Collins and Thompson (S/14) have made an experimental study of apparatus with forced convection of the saturated humid air inside a conventional glass-house still, with the condensation in a separate apparatus cooled by the feed water in the glass-house still, thus leading to a partial recycling of the heat. (See figure 11.) The coefficients of heat transfer and mass transfer are improved in this system, owing to the motion of the air, and the dispersion of the feed water into drops at the instant of its introduction into the still.

The production of such a still per square metre is appreciably increased; for 5 600 kcal/day of average insolation: 7.6 litre/m<sup>2</sup>/day, or 2.8 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/year, which is 1.4 to 1.5 times more than could be expected from well built small glass-house stills, and 2 to 3.8 times as much as the unit production of large glass-house stills.

For a small still, the additional complexity of the installation and the high cost of the auxiliaries would probably make this method uneconomic. On the other hand, for a plant with 50 000 m<sup>2</sup> of glass-house surface, the authors estimate the total investment at 55 or 93 NF/m<sup>2</sup> of glass-house surface, and determine the production cost per cubic metre of demineralized water to range from 1.57 to 2.60 NF/m<sup>3</sup>,

according to whether the cover of the glass houses is of plastic film or glass.

The same authors, after having rejected as uneconomic the methods of multiple-effect distillation at high initial temperatures obtained with concentrating collectors, have extended their original idea to a multiple-effect system in which the air, in forced circulation, passes through a series of glass-house stills with higher and higher operating temperatures. These different temperatures are obtained by using different water depths in the successive glass-house stills. The direction of travel of the air is reversed at night, to continue extraction of the heat accumulated in the deep-basin stills, employing the same principle (figure 12).

The authors have no experimental data, and therefore present no economic estimate.

The same authors have carried the logic of their idea a step further, and have likewise calculated a set-up reproducing in principle the various elements of an industrial still, with separate and distinct stages of heating, evaporation, condensation, and recovery of the heat of condensation (figure 13).

To improve the heat-transfer and mass-transfer coefficients, and to increase convection, since natural convection is slow at the temperatures considered,

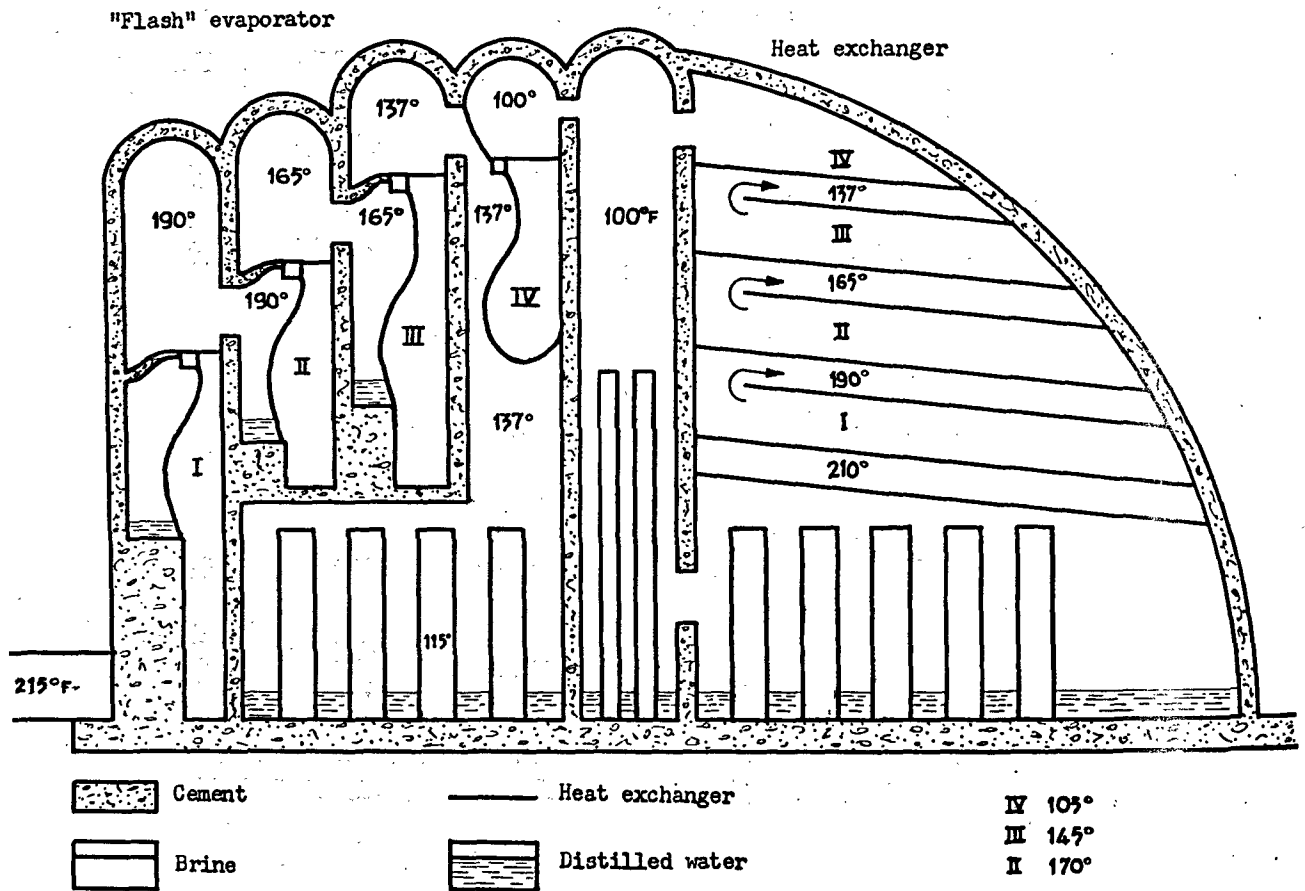


Figure 13. Large stills of new types. Multiple-effect plant

the system makes provision for forced convection of the steam, circulation of the brines, and their spraying into the air to be saturated.

For an average insolation of the order of 5 400 kcal/day, the authors estimate the production of distilled water at 26.5 litres/m<sup>2</sup>/day, or 9.7 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/year per unit surface of the solar collector used to heat the water.

These figures are 4 to 6 times as great as for small glass-house stills, and 7 to 13 times as great as for large ones.

For an installation with a collector surface of 14 400 m<sup>2</sup>, the total unit investment estimated by the authors is 90 to 100 NF/m<sup>2</sup> of collector.

The production cost of demineralized water calculated by them is 1.00 to 1.25 NF/m<sup>3</sup>.

Hummel (S/28) has developed a preliminary plan for a huge still with separate heating, evaporating and condensing equipment (figure 14).

The solar energy is collected in an immense basin with a shallow water layer, protected by a transparent cover of plastic film, itself covered by a second, similar, cover. Carbon dioxide gas is injected between the two covers, and helps to diminish the reradiation losses. The author considers that the energy collection system will be extremely efficient, and states that

the operating temperature attained by the water will be of the order of 100°C (210 to 215°F).

The water, so heated, is then routed into a quadruple-effect flash evaporator and heat exchangers. The distilled water is finally discharged at a temperature close to 30°C.

It is difficult to analyse this preliminary plan from the standpoints of thermodynamics and engineering, since the paper lacks details. The author will certainly have to answer questions about the theoretical scheme, the conditions of collection of solar energy and its utilization in the flash evaporator, and on the technique of installing these immense surfaces of plastic film.

In any case, this preliminary plan is an extremely interesting illustration of the difficulties met by the research worker and engineer when he attempts to recycle solar energy on a very large scale and work with plastic film.

We note that in his economic study the author estimates the unit production cost of distilled water at 0.37 NF/m<sup>3</sup>.

We can only hope that a more complete analysis of his preliminary project will confirm the possibility of its practical realization. The Hummel method would in fact permit us to reach in a single jump

a zone of production costs that would be acceptable for the drinking water supply of agglomerations.

J. Hirschmann (S/23) presents a preliminary plan applying the principles of thermal machines operating on small temperature differences, which in the past have long been studied by Georges Claude and Nizery for power supply and by Howe in a framework limited to the production of drinking water.

In this preliminary sketch, the solar energy is collected by means of a conventional non-distilling flat collector in which the brackish water is brought from its natural temperature of 18°C up to 70°C; these values bring the extreme temperatures of the sink and source between which the system as a whole must operate (figure 15).

An economic calculation, not included in the paper, estimates the production cost of the distilled water at 3.4 NF/m<sup>3</sup>, assuming that the electric energy likewise produced by the system will be sold at 1.7 NF/kWh.

These very high costs are, according to the author, entirely acceptable at the location where the construction of the plant is envisaged.

Baum (S/119) considers that, while the production of large quantities of water by means of large-scale glass-house stills can be envisaged, other methods might possibly be better adapted to large-scale production. He considers that this question is not yet ripe for discussion, and requires additional thorough work and consideration.

He does say, however, that if steam at a pressure of 2 to 3 atm. is produced by means of solar energy, it could either be used in a multiple-effect still, or, on the other hand, to produce electric energy, which itself could be employed for desalting by electro-dialysis.

The drinking-water production of the multiple-effect still would be of the order of 160 000 m<sup>3</sup>/year if the solar boiler whose project was previously studied by the author is used.

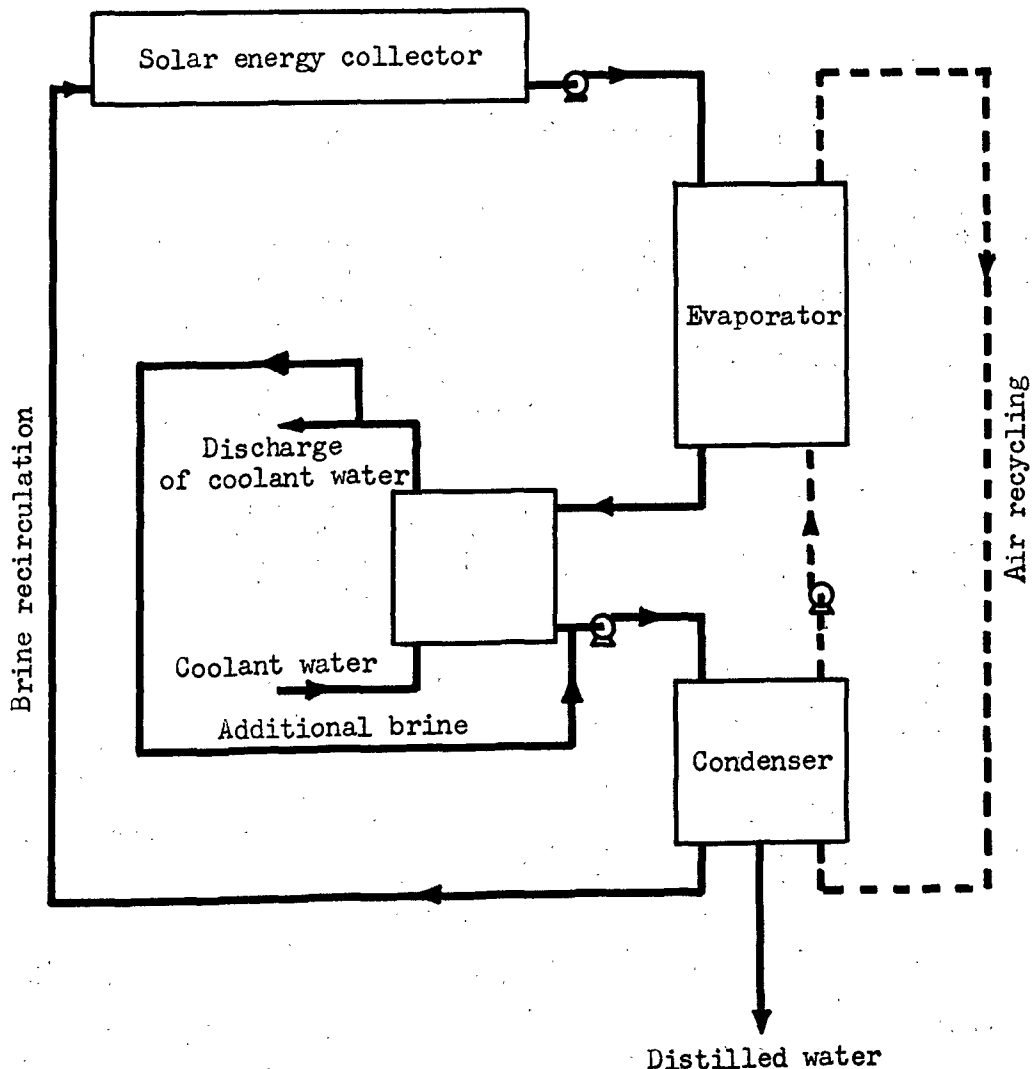


Figure 14. Large stills. New types

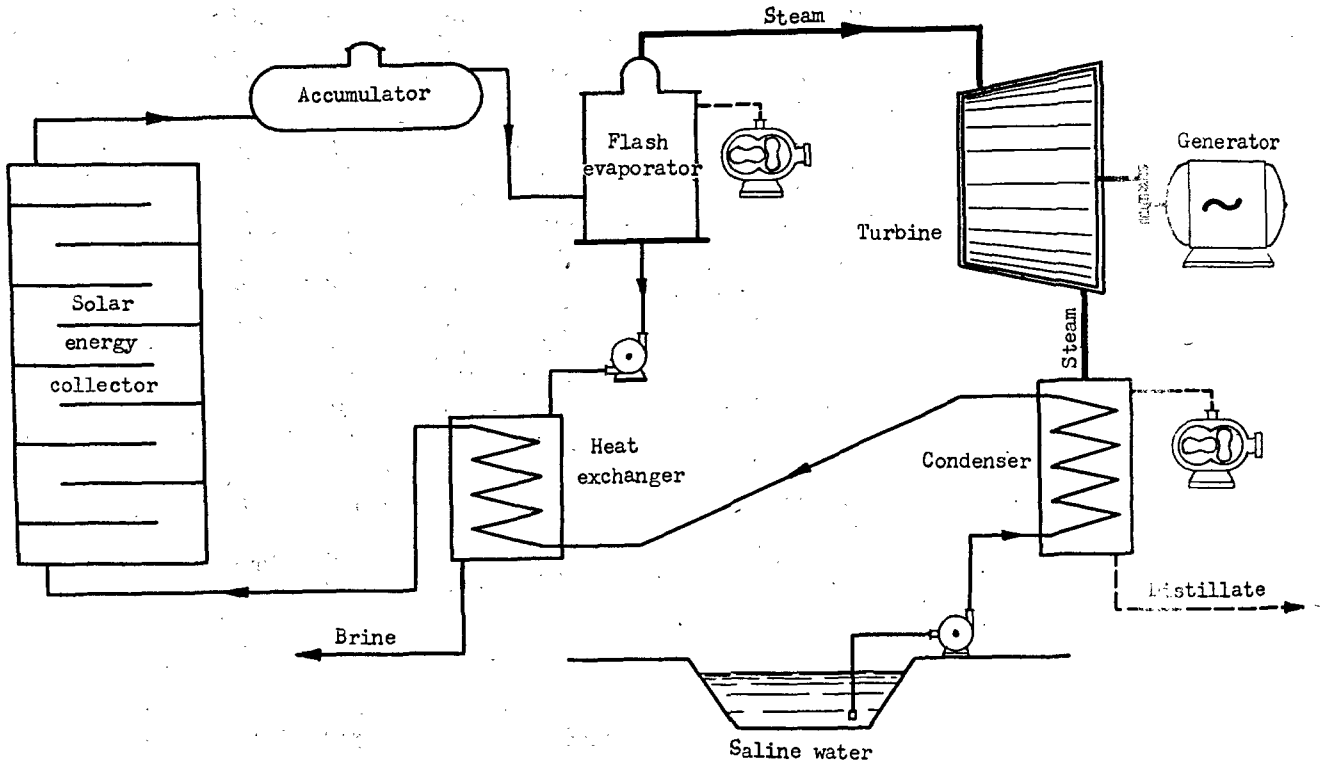


Figure 15. Still operating on small temperature difference

On the other hand, the drinking water production of an electro dialysis plant itself fed with electric energy by a turbo-alternator driven by the steam from the boiler, is given in the following table :

initial salinity of the water, g/litre. . . . .	9	4.6	10	35
10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /year . . . . .	7	1.8	0.85	0.28

Professor Baum unfortunately fails to give cost estimates.

**Conclusions**

Great progress has been made during recent years in our knowledge of glass-house type solar stills. We know today the parameters governing their operation, and we are aware of the design characteristics that must now be sought.

The possible unit production of fresh water by such stills is confined to the range : 1.5 to 2 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/year.

For such stills, an increase in size should in most cases lead to diminished efficiency.

It does not seem possible to improve the efficiency of these plants appreciably by means of design improvements.

Our efforts should thus be concentrated on decreasing their unit construction cost, naturally bearing in mind the service life of the materials and the unit water production anticipated.

Allowing for the operating conditions (labour), and for the low unit production of single-effect glass-house stills, even a substantial decrease in

the unit construction cost would still demand very large scale installations.

For the unit cost of the fresh water to be acceptable, the method of forming immense surfaces covered with a transparent material, which, in turn, covers a layer of water on an impermeable and thermally insulating soil, should be one of the principal subjects of concern to investigators in the years to come. It would seem that the use of specially treated plastic film (transparency, spectral selectivity, wettability) would be a fruitful method, but one which would still involve a large number of unknown factors.

The difficulty encountered in realizing the large surfaces just mentioned gives particular interest to two lines of research :

Multiple-effect distillation of warm water at 50 to 60°C. If a system inexpensive to construct and operate were developed, it would allow an appreciable decrease in the size of the surface necessary for collecting the solar energy, or would validate higher unit costs for these surfaces;

Production of distilled water as the condensate from turbines operating at small temperature differences. The development of such machines, which have already been the object of previous research, might considerably simplify the collector problem, which today is the economic stumbling block that prevents the large-scale use of solar distillation.

The solar energy collector might then be simply a lagoon protected against evaporation by a film (plastic film, liquid, floating material, etc.). One might likewise seek to prevent the cooling of this

lagoon by means of anticonvection systems. The unit capital cost of the relatively imperfect collector so produced might be very low, which would to a considerable extent compensate the low efficiency of the collection of solar energy.

One might equally envisage the collection of solar energy by hot air.

Specialists are not unanimous on the advantage that might be gained by increasing the collection temperature, in order to facilitate the subsequent utilization of the solar energy and, more particularly, its recycling. It would be of interest to have numerical studies of very large installations made to settle this question. It does appear, however, that such a procedure would probably be more expensive for small installations.

#### ANNEX

When water is scarce, or when its production cost is high, one method consists in decreasing the amount of water required. This is what Trombe and Foëx propose, in recommending the use of cultivation of crops in arid region under distilling glass-houses.

The microclimate thus produced, under certain conditions of operation and certain ratios between insulated surface and the surface kept in the shadow, permits the conditions of the tropical forest or the Saharan palm grove to be approximated.

The water required for the life of the plants is produced by stills close in the upper part of the glass-house. The quantity of water required is very much less than that demanded by irrigation in the open air.

This method is still in the study stage and is the subject of systematic experimentation by the authors in the South of France, and by Gomella (S/107) at Touggourt in the Sahara.

Water produced by stills is often of disagreeable taste or odour. But its mineral content is also too low for constant consumption

in a climate where people perspire abundantly. Such water must therefore be made potable. The control of taste and odour presents no difficulty, and percolation through activated charcoal usually corrects these conditions perfectly. Such water may be remineralized by mixing with the distilled water a small fraction of the saline water (large installations), or by percolating the distilled water through a small filter charged with the required mineral elements (domestic stills).

Finally, solar stills will not be immune to the problems posed by the saline deposits from the brackish water evaporated. Supersaturation and deposition can be avoided by increasing the depth of the water layer, especially in the case of sea water. But it is not always desirable to increase the depth of the water layer, as we have already seen. Moreover, certain underground waters, even of medium salinity (3 to 6 g/litre) may be of an ionic composition causing abundant precipitation of gypsum and calcium carbonate. This is a problem that has already been discussed at earlier meetings, and which has been treated by Lejeune in his paper (S/89).

#### Suggested topics for discussion

1. What would be desirable designs for small solar stills for household use in arid zones?
2. What are the present possibilities and future prospects for the use of plastics in large and small solar stills and what properties of plastics should be sought for the energy collectors?
3. Should research on the large-scale production of fresh water by means of solar energy be concentrated on large-scale stills or on energy collectors separate from equipment utilizing such energy?
4. What are the respective prospects for solar distillation offered by:
  - (a) Large-capacity, high-temperature collectors,
  - (b) Low-efficiency, low-temperature collectors of simple design?

# EMPLOI DE L'ÉNERGIE SOLAIRE POUR LA PRODUCTION D'EAU DOUCE

## Résumé du rapporteur

L'application de l'énergie solaire au dessalement des eaux pose un problème d'une importance primordiale, puisque sa solution permettrait de répondre simultanément à deux besoins essentiels de l'humanité : l'énergie source de toute activité organisée et l'eau source de la vie.

Depuis les derniers congrès de Tucson-Phoenix en 1955 et de Mont-Louis en 1958, les connaissances dans le domaine qui intéresse le point III.E de l'ordre du jour sont devenues beaucoup plus précises, à la suite de très nombreuses et excellentes études expérimentales et théoriques, menées par les chercheurs dont les noms sont présents à tous les esprits.

De l'avis presque unanime de toutes les personnes compétentes en la matière, la Conférence actuelle a lieu à une date fort bien choisie en ce qui concerne le point III.E. Elle nous permet de faire le point, de jeter un regard en arrière, et d'essayer de deviner quel succès l'avenir réserve aux efforts que nous déploierons.

Il semble bon de se fixer un programme pour les cinq années à venir, comme le disait notre président. Mais faudrait-il encore distinguer les objectifs à portée immédiate qui doivent donner des résultats concrets au cours de ces cinq années à venir, et les objectifs plus généraux dont les résultats, positifs ou négatifs, ouvriront la voie à un choix rationnel pour les sujets de recherche dans les périodes ultérieures.

Dans l'état actuel des choses et en ce qui concerne les possibilités pratiques dans un proche avenir, pour être appliquée au dessalement des eaux, il est indispensable que l'énergie rayonnante solaire soit transformée en énergie thermique. De plus, les procédés de dessalement qui apparaissent les seuls immédiatement utilisables sont ceux qui réalisent une distillation.

Enfin, le seul procédé qui ait donné lieu à ce jour à la construction d'appareils d'usage public est celui de la distillation à simple effet utilisant le processus de la « serre ». Ce processus est maintenant fort bien étudié dans ses détails, aussi bien par expérimentation que par le calcul.

Un des points fondamentaux acquis au cours de cette Conférence est la très bonne concordance des conclusions de chercheurs travaillant suivant des méthodes différentes et sans liaison entre eux en ce qui concerne la distillation utilisant l'effet de « serre ».

Les critères des qualités auxquels doivent répondre ces distillateurs pour avoir le meilleur rendement sont :

- Une température de fonctionnement élevée;
- Une inertie thermique faible;

Une distance surface évaporatoire-condenseur faible;

Des ombres portées sur la surface évaporatoire les plus faibles possible.

On sait également à présent dessiner un bon distillateur de type « serre »; par contre, on sait également que sa réalisation exige l'emploi de matériaux susceptibles de répondre à des conditions de service très dures :

Corrosion;

Entartrage;

Déformation par l'humidité;

Déformation par la dessiccation;

Déformation sous l'effet de fortes variations de température;

Érosion éolienne;

Action des agents atmosphériques;

Viellissement sous l'effet du rayonnement atomique.

L'art de l'ingénieur étant celui du compromis intelligent et rentable, il est certain que l'on ne peut aveuglément chercher à appliquer les enseignements théoriques, et que pour assurer simultanément un bon rendement des conditions de fabrication ou de construction admissibles, une bonne longévité et des conditions d'exploitation acceptables, il faudra simplement tendre à respecter les caractéristiques optimales, sans pouvoir toujours s'y plier entièrement.

Par exemple, si une épaisseur d'eau voisine de zéro est théoriquement souhaitable, les chercheurs sont unanimes pour la fixer pratiquement entre 2,5 et 5 cm dans de petites serres, et de 5 à 15 cm dans des appareils de grande dimension.

Dans l'état actuel des choses, la distillation solaire a atteint le stade où elle peut satisfaire à des besoins de très faible ou de moyenne importance, au moyen d'appareils utilisant l'effet de serre.

Il convient d'insister sur le fait qu'on est là devant une acquisition définitive, et que ceci mérite d'être diffusé dans les pays intéressés.

Seul le manque d'information empêche la généralisation de l'emploi de ces appareils en de nombreux points où la fourniture de faibles quantités d'eau de boisson ou de bonne qualité est indispensable.

La technique actuelle a mis au point deux modes de réalisation :

1) Celle de tout petits distillateurs unitaires de un ou quelques mètres carrés, qui répondent à des besoins individuels ou familiaux;

2) Celle d'appareils de dimensions plus importantes construits avec des matériaux classiques (asphalte,



béton, vitres) ou des matériaux nouveaux (films plastiques maintenus en forme par une pression d'air).

Il est difficile, à l'heure actuelle, de dire laquelle de ces solutions est la plus avantageuse, et beaucoup de spécialistes sont partisans de la réalisation de surfaces distillatoires de dimensions moyennes à l'aide d'une juxtaposition de petits appareils unitaires.

Le choix entre tel ou tel dispositif est essentiellement commandé par des impératifs locaux. On peut seulement dire que les appareils d'une certaine dimension sont mieux adaptés à une réalisation locale qui n'est pas toujours possible et souvent difficile, et que les appareils de petites dimensions sont par contre parfaitement adaptés à une fabrication en grande série qui peut en faire sensiblement diminuer le prix.

La production de l'ensemble de ces appareils varie suivant leur conception ou le fini de leur réalisation de 0,8 à 2 m<sup>3</sup> d'eau par m<sup>2</sup> et par cm. Les prix au m<sup>2</sup> pour des appareils d'une longévité voisine de 20 ans varie de 300 à 75 NF au m<sup>2</sup>. Dans ces conditions, le prix de revient de l'eau produite reste encore considérable et ne peut concurrencer les prix actuellement pratiqués dans les adductions d'eau potable et dans les systèmes d'irrigation.

Par contre, ces prix sont tout à fait admissibles lorsqu'il s'agit de mettre en place des groupes humains dans des régions dépourvues d'infrastructure énergétique, pour assurer aussi bien les besoins en eau de boisson que l'alimentation des machines et des appareils, souvent plus exigeants que l'homme en ce qui concerne la qualité des eaux.

Dans le cas présent, des résultats d'un intérêt limité mais certain ont donc été atteints.

Que devons nous faire à l'avenir? Avant toute chose, développer et perfectionner les procédés qui ont d'ores et déjà atteint un stade pratique. L'unanimité de la Conférence est totale. Des perfectionnements substantiels sont possibles. Ils sont déjà entrevus dans certaines branches, et on peut très sérieusement penser que les prix indiqués plus haut seront divisés par deux ou peut-être plus. Par ailleurs, il faut chercher des voies nouvelles. L'exploitation des plus évidentes a déjà été entreprise: c'est celle des appareils à recyclage de l'énergie à multiples effets. D'autres ont leurs partisans: par exemple celles des appareils utilisant l'énergie à très bas niveau, captée par des moyens peu onéreux dans des lagunes.

Ces deux voies doivent être exploitées, et on doit y consacrer du temps et des moyens financiers. Elles n'aboutiront vraisemblablement pas à des réalisations pratiques spectaculaires dans la période de cinq ans qui vient, mais on peut espérer qu'elles donneront la possibilité, dans la prochaine décennie, de diviser les prix de revient actuels par 10 ou même plus, ce qui permettra au dessalement par l'énergie solaire de déboucher dans le domaine de l'alimentation des agglomérations et dans celui de l'irrigation.

Il convient cependant de noter que le chercheur, engagé dans les voies nouvelles dont je viens de parler, bénéficierait certainement des résultats obtenus dans les domaines plus généraux que sont ceux des collecteurs plats ou à concentration et de la production d'énergie mécanique et d'électricité.

Il est donc particulièrement important que les chercheurs intéressés par le problème particulier du dessalement des eaux se tiennent très étroitement au fait des travaux menés par leurs collègues dans les autres domaines d'application de l'énergie solaire.

# USE OF SOLAR ENERGY FOR PRODUCTION OF FRESH WATER

## *Rapporteur's summation*

The use of solar energy for the desalination of water represents a problem of vital importance, for its solution would make it possible to meet simultaneously two essential needs of mankind: the need for energy as a source of all organized activity, and the need for water as a source of life.

Since the last congresses — the one held at Tucson and Phoenix in 1955, and the one at Mont-Louis in 1958 — knowledge in the field with which agenda item III.E is concerned has become far more exact as a result of a great number of excellent experimental and theoretical studies carried out by researchers whose names are known to all.

In the virtually unanimous opinion of all persons specialized in the field, the present Conference has been held at a particularly appropriate time as far as item III.E is concerned. It enables us to take our bearings, to consider the past and to try to guess how successful our efforts may be in the future.

Although it seems advisable to draw up a programme for the next five years, as our President has recommended, it is also necessary to draw a distinction between objectives immediately within reach which should yield concrete results within the next five years, and more general objectives the results of which, whether positive or negative, will open the way to a rational choice of research topics in later periods.

In the present state of knowledge and as far as the practical possibilities in the near future are concerned, the energy from solar radiation must be transformed into thermal energy to be used in the desalination of water. Moreover, the only desalination procedures which seem to be immediately feasible are those which involve distillation, and the only procedure which has so far led to the construction of devices for general use is that of single-effect distillation by means of the so-called glass-house process. This process has now been thoroughly studied in all its details, both experimentally and theoretically.

One of the outstanding features of this Conference has been the great measure of agreement between the conclusions of researchers using different methods and working independently of one another in regard to distillation by means of the "glass-house" process.

For optimum efficiency, these distilling devices should possess the following properties:

- High operating temperature;
- Low thermal storage;
- Short distance between evaporator and condenser;

Faintest possible shadow on the evaporating surface.

Adequate information is now available on how to design a good distilling device of the "glass-house" type and on the need to use for its construction materials that will be capable of meeting very severe service conditions, such as:

- Corrosion;
- Scaling;
- Deformation due to humidity;
- Deformation due to desiccation;
- Deformation due to great range of temperature;
- Erosion by the wind;
- Action of atmospheric agents;
- Aging under the action of actinic radiation.

Since the art of the engineer is the art of making intelligent and advantageous compromises, it is obvious that theories cannot be put into practice blindly and that to achieve a combination of maximum efficiency in manufacture or construction, long service life and satisfactory operating conditions, it is necessary to strive for optimum characteristics without always being able to conform to them completely.

For example, while a water depth close to zero is theoretically desirable, researchers are unanimous in fixing it for practical purposes between 2.5 and 5 cm in small glass-houses and between 5 and 15 cm in large-scale plants.

In present circumstances, solar distillation has reached the stage where it can satisfy needs of very low or medium magnitude by means of apparatus of the glass-house type. It must be stressed that this is an established fact which should be publicized in the countries concerned. It is only lack of information which prevents a wider use of such apparatus in many places where the provision of small quantities of drinking water or of good quality water is essential.

Present techniques have made it possible to develop two methods of operation:

(1) The use of very small distilling units of from one several square metres to satisfy the needs of individuals or families;

(2) The use of larger-scale equipment constructed with either conventional materials (such as asphalt, concrete or plate-glass) or new materials (such as plastic film kept in shape by air pressure).

At the present time it is difficult to say which of the two possibilities is the more advantageous, but a number of specialists favour medium-sized

distilling surfaces in conjunction with small distilling units.

The choice between one type of device and another is essentially determined by local needs. It can merely be said that plants of a certain size are better adapted to some local situations but are often difficult and sometimes impossible to install; small-sized plants, on the contrary, are perfectly suited to mass production, which would significantly diminish the price.

The output of these devices as a whole ranges according to their design and degree of refinement, from 0.8 to 2 cubic metres of water per square metre per year. The price per square metre for plants with a service life of approximately twenty years ranges from 75 to 300 new frames. In these circumstances, the cost of the water produced remains relatively high and is not competitive with natural drinking water or irrigation systems at present-day prices.

Where, on the other hand, it is a question of settling groups of persons in regions which have no basic energy resources, such prices are perfectly reasonable in order to satisfy both the need for drinking water and the requirements of machines and equipment, which are often more demanding than man in regard to the quality of water.

In the present case, some limited but certain results have therefore been achieved.

What, then, should we do in the future? First of all, develop and perfect the procedures which have now reached the practical stage. The Conference

is in complete unanimity on this point. Substantial improvements are possible. These are already being contemplated in some branches, and there are very serious grounds for thinking that the costs indicated above will be cut by half or even more. Moreover, new methods must be sought. The exploitation of the most obvious of these has already begun, namely, the method of multiple-effect plants for the recycling of energy. Other methods also have their champions: for example, that of plants using a very low level of energy derived from lagoons by fairly inexpensive means.

Both these methods should be used, and time and money should be expended on them. They will probably not produce spectacular practical results within the next five years, but it may be hoped that, within the next decade, it will be possible through these means to reduce costs to one-tenth, or even less, of what they are now, an achievement which would make desalination by means of solar energy feasible for supplying drinking water to large population groups and for irrigation.

It must, however, be pointed out that the researcher, working in the new fields just mentioned, will certainly benefit from the advances in the more general fields of flat or concentrating collectors and of the production of mechanical and electrical energy.

It is therefore particularly important for research workers interested in the particular problem of the desalination of water to keep very closely in touch with the work carried out by their colleagues on other aspects of the use of solar energy.

## SOLAR DISTILLERS

*Valentin A. Baum\**

Considerable attention has been paid to solving the problem of water supplies in arid and semi-arid zones. In addition to the many other methods, the method of utilizing solar energy to distil water has been considered.

At present, it is possible to obtain by calculation the technical characteristics of solar installations and how they are influenced by the materials used for the different parts of the installation, the influence of conditions in which they operate, etc.

This paper discusses certain methods of distilling salt water by using solar energy.

### Hot-box stills

The design of this type of still is very simple (figure 1) and at the same time extremely rational from the point of view of the physical processes taking place in it. The efficiency of a still carefully and correctly built amounts to 60-70 per cent. Calculations show that this figure is close to the maximum which can be obtained in stills made out of ordinary materials: glass or plastic for the top, asbocement, plastic or wood for the structure, cork or plastic for the insulation.

This construction was repeated in different variations by many investigators (1-8).

In recent years, it has again attracted the attention of investigators. The most extensive experiments were made by M. Telkes (9), K. Gomella (10), G. Nebbia (11) and E. Howe (16).

A great deal of information has already been accumulated on the specific capacity of such constructions. However, the capacity varies greatly in the estimates of the various researches. This can be explained by the specific features of the design of the different installations, as well as by the climatic conditions in which they operated.

Figure 2 shows the results obtained by M. Ginestous in 1927 (4), A. N. Tekuchev in 1933 (8) and K. Gomella in 1955 (10) on the specific capacity of stills in litres per square metre per day. The efficiency is a characteristic more stable than the capacity and depends comparatively little on climate conditions (figure 3). It is determined mostly by the quality of the design. It is noteworthy that the efficiency of the installations used by Ginestous and Gomella were very different, although actually they used the same materials for construction purposes. Con-

sequently, the reason for the difference in efficiency should be sought elsewhere. Judging from the description, the Ginestous distiller had comparatively high sides, non-transparent to the sun's rays: the front southern wall was 10 cm higher than the water level and the back wall 29 cm higher. They threw a shadow on the tray filled with water and this, naturally, was one of the reasons for the low efficiency.

In our Helio-laboratory, a distiller with high side-walls was also investigated (12); we also obtained a low efficiency rate (about 20 per cent) and the daily capacity was about two litres per square metre per day.

In Gomella's distiller, however, the height of the sidewalls did not exceed the height of the tray and practically no shadow was cast. Similar designs were made and tested by M. Telkes in Cohasset, United States, and G. Nebbia in Naples, Italy. They obtained a specific capacity of about 6 l/m<sup>2</sup> per day with an efficiency of approximately 70 per cent.

These have been done before on the basis of certain laws of heat transfer and data obtained when testing stills (6, 8 and 9). At present, a system of equations can be formulated which will describe sufficiently accurately the thermal processes in the still and make it possible for a given design to calculate the efficiency and capacity, knowing only the radiation and surrounding conditions.

The proposed system of equations is based qualitatively on the picture of the flow of the vapour-air mixture in the still. In order to compose the quantity relationships, equations are used from the field of optics and thermophysics which describe the processes of transformations and distribution of energy. Since these processes in the still are extremely complicated and their detailed consideration would result in a very clumsy system of equations, certain simplifications have been introduced, which do not distort the results. These simplifications are not always stated in the text, in order not to complicate it by a large number of details. The system of equations obtained can be

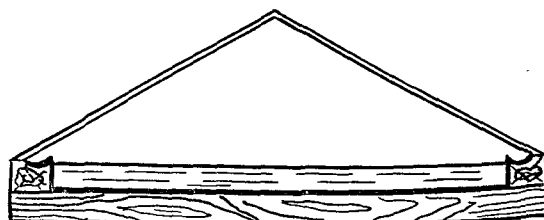


Figure 1. Hot-box still

\* Deputy Director, Krzhizhanovsky Power Institute, Moscow.

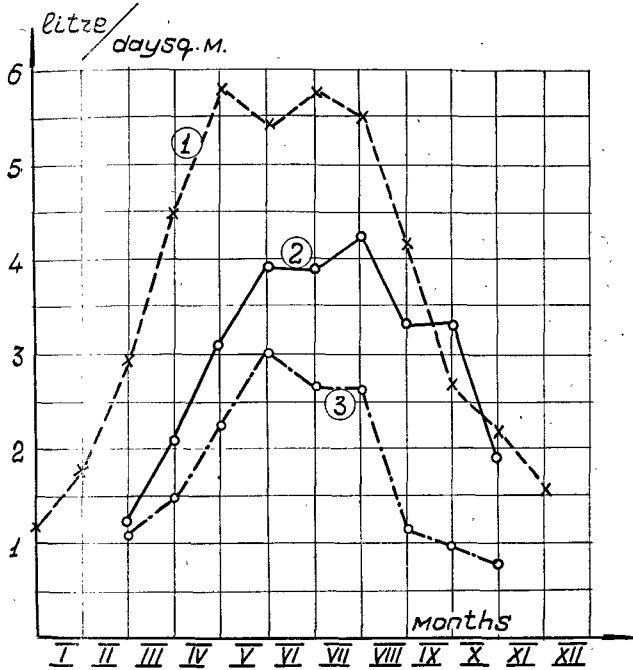


Figure 2. Specific capacity of stills investigated by (1) Gomella, (2) Tekuchev and (3) Ginestous

made more precise in any part by replacing separate equations with more accurate ones or by introducing additional equations. More precise results can also be obtained by an analysis of the figures in the various variants of the calculations conducted according to the proposed system.

The qualitative work of the distiller is regarded as follows. Part of the radiant energy falling on the distiller is lost as a result of the reflection from the glass, the surface of the water and the bottom. However, the main part of this energy is absorbed by the bottom and the layer of water and is transformed into heat. Consequently, the bottom and the water in contact with it have the highest temperature in the system.<sup>1</sup> The heat will, therefore, be conveyed to the ambient air in quantities corresponding to the temperature of the various parts of the installation and the thermophysical properties of the materials of which these parts are built.

The steam-air mixture in the vicinity of the glass has a lower temperature and a greater specific gravity than near the water. Consequently, from the surface of the glass, the mixture goes down, and from the surface of the water, it rises. The angle at which the glass is set imparts a certain order to the movement, and circulation flows are formed (figure 4).

In passing close to the water, the mixture is heated up and saturated with vapour; when touching glass it cools off, becomes over-saturated and moisture falls out and settles on the surface of the glass and rolls down. The abovementioned processes of heating

<sup>1</sup> If the glass has a greater coefficient of absorption and the bottom is badly insulated and cools off rapidly, the glass can have a higher temperature than the other part of the distiller, in which case the distiller will not function.

and cooling off (and, consequently, the evaporation of the water and the condensation of vapour) take place in a comparatively thin layer close to the water and the glass. It practically does not penetrate into the rest of the mass, since the diffusion and molecular heat conduction are small and there is no noticeable mixing of the cold and warm masses in the volume.

On the basis of this general qualitative picture of the work of the distiller, the thermal processes taking place in it can be pictured as follows.

The heat arising from the absorption of the radiant energy by the layer of water and the bottom is expanded in a stationary process for the evaporation of water on the tray and to cover up the losses of heat, the principal ones being the following:

(a) The loss of heat from the water in the tray through the bottom of the distiller ( $Q_2$ );

(b) Losses due to radiant heat transfer between the layer of water and the surface of the glass ( $Q_3$ );

(c) Losses due to the transference of heat from the surface of the water to the glass by the air contained in the mixture in the course of its circulation in the distilling chamber ( $Q_4$ ) (these losses, however, are very small);

(d) If there are cracks in the roof of the still, a considerable part of the steam-air mixture will be lost and the efficiency of the still will fall sharply. We are examining cases in which the still is well made and these last losses do not occur.

The quantity of heat given off by the steam-air mixture when passing in the vicinity of the glass  $Q_4$  determines the quantity of water condensed on the glass surface.

Obviously, the sum  $Q_2 + Q_3 + Q_4$  plus the heat which is formed by absorption of solar radiation by the glass represents the quantity of heat that must pass through the glass as a result of heat conductivity and then must be given off from the surface of the glass by convection and radiation to the ambient air.

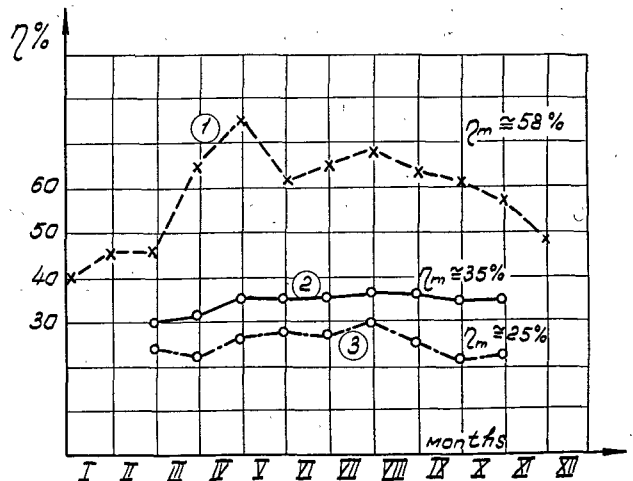


Figure 3. Efficiency of stills: (1) Gomella, (2) Tekuchev, (3) Ginestous

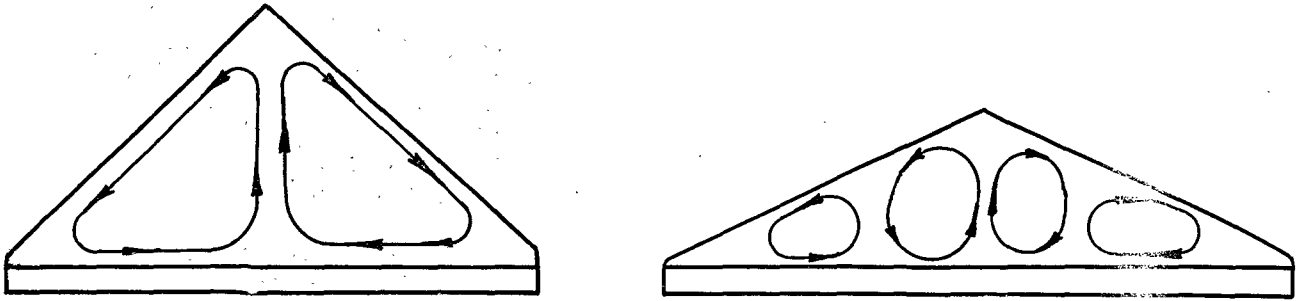


Figure 4. Diagram of circulatory flows of vapour-air mixture in still of hot-box type

The system of equations for hot-box stills can then be expressed as follows, with

$I$  = solar radiation on the horizontal surface in kcal/m<sup>2</sup>hour

$T$  = transparency of the glass

$\rho$  = reflectivity of glass surface

$A$  = absorptivity of glass (or other materials)

$K$  = absorption coefficient of glass,  $I/m$

$d$  = thickness of glass, m

$Q$  = heat flow per square metre in the construction kcal/m<sup>2</sup>hour

$\Theta$  = temperature of water and steam-air mixture, °C

$V$  = ambient temperature, °C

$t_1$  = temperature of inner surface of glass, °C

$t_2$  = temperature of outer surface of glass, °C

$\lambda$  = heat conductivity coefficient of glass, insulation, etc., kcal/m hour, °C

$C$  = radiation coefficient kcal/m<sup>2</sup>hour (°C)<sup>4</sup>

$f = \frac{F_g}{F_w}$  ratio of surface of glass to surface of water in the tray of the distiller.

The indices  $g$ ,  $b$ ,  $w$ ,  $in$ ,  $d$  and  $st$  stand for glass, bottom, water, insulation, air and steam, respectively.

The heat balance of the still depends on many factors, but it is unfeasible to use complicated exact formulae. For example, it is possible for preliminary calculations to neglect the repeated absorptions and reflections in the glass, etc.

Thus the amount of direct radiation let through by the glass, which is determined from the formula

$$T = \frac{(1-\rho)^2 e^{\frac{-kd}{\cos i}}}{1-\rho e^{\frac{-kd}{\cos i}}}$$

can be calculated from one of the following simplified formulae

$$T \cong (1-\rho)^2 e^{\frac{-kd}{\cos i}} = (1-\rho)^2 (1-Ai) \cong 1-2\rho-A$$

where  $Ai$  is the absorptivity of glass having a thickness  $d$  and with an angle of refraction  $i$ .

The first simplified formula for high-grade glass gives an error of not more than 0.1 per cent, and the last formula an error which does not exceed 1.5 per cent. The differences between the accurate and some of the approximate formulae were examined by D. Parmelly (14).

Direct and diffuse radiation pass through the glass differently, as the average path of the rays of diffuse radiation in glass is greater than the path of the rays of direct radiation which fall on the glass perpendicularly, and the resulting reflection of these two forms of radiation is also different. Consequently, the passing of direct and diffuse radiation through the glass should be estimated separately. It is possible, however, for the convenience of calculations, to take into account the diffuse radiation by means of a coefficient. Thus, for instance, D. Parmelly showed that the passing of diffuse radiation through the glass could be regarded in the same way as a similar quantity of direct radiation falling on the glass at an angle of 60°. Consequently, the calculations can be carried out as if given a conditional radiation

$$I_o = I_{dir} + KI_{dir}$$

where  $K$  is a coefficient less than 1.

We can now compose the system of equations determining the thermal balance for one square metre of surface of the still per hour.

On the basis of the above, the quantity of radiant energy absorbed by the bottom and transformed into heat can be determined from the following approximate formula:

$$Q_1 = I_o (1-\rho)^2 (1-A_g) (1-R_w) A_b \quad [1]$$

The heat losses through the bottom which has an insulation of thickness  $\delta$  and a heat conductivity  $\lambda$  kcal/m<sup>2</sup> hour °C, with a coefficient of heat loss from the lower surface of the installation into the ambient air

$$\alpha = 15 \text{ kcal/m}^2\text{hour}^\circ\text{C},$$

$$Q_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta g}{\lambda}} (\Theta - V) \quad [2]$$

The insulation being good enough,  $\alpha$  slightly affects  $Q_2$ . If we take an insulation layer 25 mm thick, with

$$\lambda_{in} = 0.03, \text{ then: } \frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{\lambda} \cong 1$$

so that

$$Q_2 = \Theta - V \quad [2a]$$

The heat loss to the glass from the water by radiation

$$Q_3 = C \left[ \left( \frac{\Theta + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 \right] \quad [3]$$

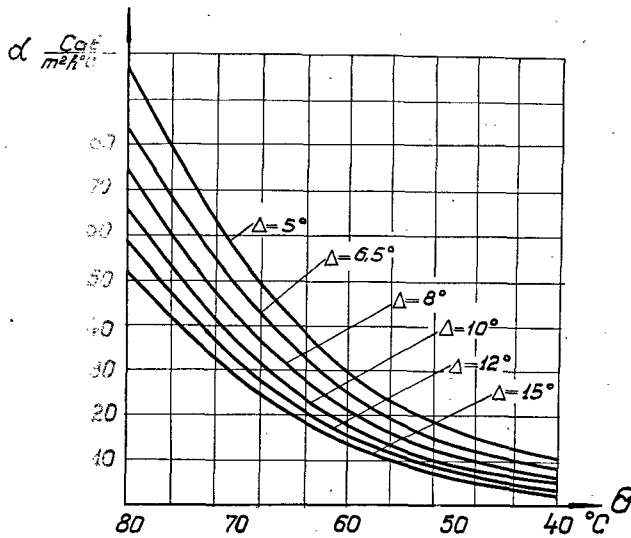


Figure 5. Heat-transfer coefficient  $\alpha$  depending on temperature of steam-air mixture  $\theta$  and difference of temperatures of the mixture and condensation surface  $\Delta t = \theta - t_1$

The heat loss from the vapour-air mixture to the glass

$$Q_4 = \alpha_{\text{conv}} (V - t_1) \quad [4]$$

Heat conduction through the glass<sup>2</sup>

$$Q_5 = Q_3 + Q_4 + \frac{I_o A_g (1 - \rho)}{2} = (t_1 - t_2) \frac{\lambda g}{\delta g} f \quad [5]$$

Heat loss by radiation and convection from the glass to the ambient air

$$Q_6 = \left\{ Ci \left[ \left( \frac{t_2 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{V + 273}{100} \right)^4 \right] + 15 (t - V) \right\} f \quad [6]$$

The equation for the heat balance received by the water  $Q_1$  and given off through the bottom  $Q_2$ , as well as the result of heat exchanges with the glass  $Q_3 + Q_4$

$$I_o (1 - \rho)^2 (1 - A_g) (1 - R_w) A_b = Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad [7]$$

The equation for the heat loss from the glass by convection and radiation into the ambient air  $Q_6$  being equal to all the heat brought to the glass including the heat received by the glass as a result of the absorption of radiation in it, is as follows:

$$Q_6 = Q_3 + Q_4 + I_o (1 - \rho) A_g \quad [8]$$

<sup>2</sup> Here we have also taken into consideration the heat loss in the glass as a result of absorbed radiation  $I_o A_g (1 - \rho)$ . Since  $A_g$  is small compared with 1, the absorption of radiation in the thickness of the glass can be considered to take place evenly. Then

$$-\lambda \frac{dt}{dx} = Q_3 + Q_4 + \frac{I_o A (1 - \rho)}{\delta} X;$$

$$-t_x = (Q_3 + Q_4) \frac{X}{\lambda} + \frac{I_o A (1 - \rho)}{\lambda \delta} X^2 + c$$

and with  $\begin{cases} X = 0 & t = t_1 \\ X = b & t = t_2 \end{cases}$  we get equation [5]

The coefficient of heat transfer from the steam-air mixture to the glass can be computed from the approximate formula

$$d_{\text{conv}} \cong 152 - 5.75 \Theta + 0.0583 \Theta^2 \quad [9]$$

More precise meanings of  $\alpha_{\text{conv}}$  can be taken from figure 5, which is also based on these experiments.

### Results of calculations and their analysis

The system of equations [1-9] was used to study the influence of the conditions in which the distiller operated on its technical characteristics. Variant calculations were carried out on a computer.

In this distiller, there is no regeneration of heat; therefore, like most other authors, we regard the efficiency to be the ratio of the heat used to heat the water in the distiller and to evaporate it to the energy received from the sun. Consequently, it can be calculated from the following equation

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2 - Q_3 - Q_4}{I_o} \quad [10]$$

where  $Q_4$  is the heat lost by the air in the circulating vapour-air mixture, when it is cooled off from  $\Theta$  to  $t_1$ .

The specific capacity (per square metre of water surface in the tray) is obtained from the obvious equation

$$G = \frac{I_o \eta}{i_{st} - i_w} \frac{\text{kg}}{\text{hour m}^2} \quad [11]$$

where  $i_{st}$  is the enthalpy of the vapour in the distiller  $\text{kcal/kg}$ , and  $i_w$  is the enthalpy of the water poured into the distiller.

The temperature of the vapour-air mixture in the distiller usually has a temperature of 50-80°C and then  $i_{st} = 618-630 \text{ kcal/kg}$ .

If the temperature of the water poured into the distiller is taken to be equal to 20-30°C, then

$$G \cong \eta \frac{I_o}{600} \frac{\text{kg}}{\text{hour m}^2} \quad [12]$$

The influence of the following factors was investigated: (a) solar radiation  $I_o$ : 1 200, 1 000, 800, 700, 300  $\text{kcal/m}^2 \text{hour}$ ; (b) temperature of ambient air  $V$ : 5, 10, 15, 25, 30, 40, 50°C; (c) absorptivity of the glass  $A_g$ : 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30; (d) the ratio of the surface of condensation (i.e., the surface of the glass on which the condensation takes place) to the surface of the water in the tray: 1, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5. The results of the calculations are given in figures 6-13.

On the basis of this material, as well as from the results obtained by a number of authors, the following conclusions could be drawn.

The efficiency of the distiller is fairly stable; even if the radiation drops to one-fourth of its initial value (from 1.200  $\text{kcal/m}^2 \text{hour}$ , when there is a simple device for concentrating the rays, to 300  $\text{kcal/m}^2 \text{hour}$ ), it changes within the limits from

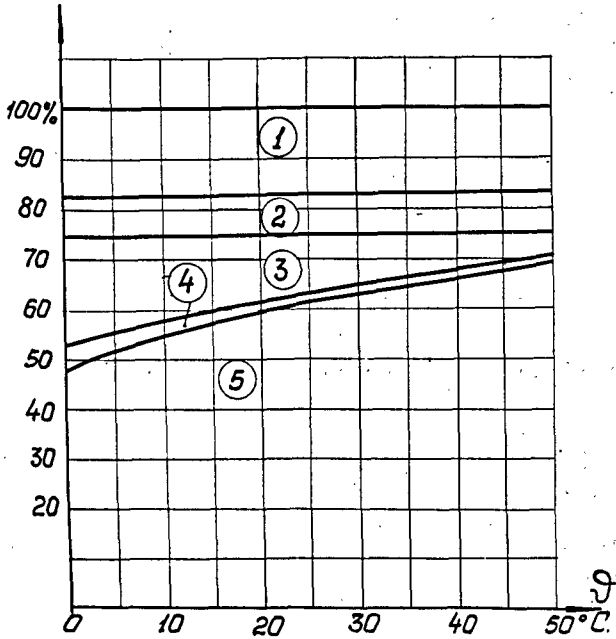


Figure 6. Influence of outside temperature  $V$  on heat balance of still

1 = losses (in per cent of 1) as a result of reflection of rays from glass, water and bottom; 2 = losses of heat through bottom; 3 = losses through heat transfer by radiation between surfaces in water and glass; 4 = losses due to cooling off of air circulating of distiller chamber; 5 = useful heat spent on distilling water

73 to 43 per cent. For approximate calculations of the annual capacity of a well-built distiller from ordinary materials, the efficiency can be taken as 50-60 per cent for the warm months (outside temperature, 20-40°C) and 40-50 per cent for the cooler months (5-15°C). The formula [12] should be used, replacing in it the monthly sums of radiation on a horizontal surface minus 5-15 per cent, and remember-

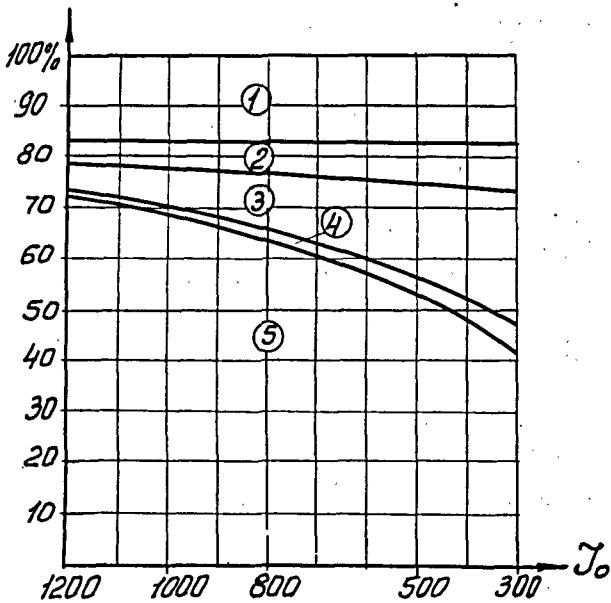


Figure 7. Heat balance of still depending on incident radiation on horizontal surface  $I_0$

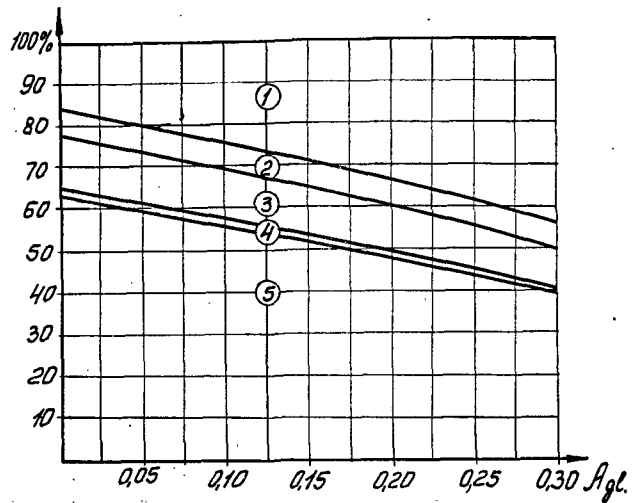


Figure 8. Influence of radiation absorptivity of glass  $A_g$  on heat balance

ing that when the sun is low in the sky, the greater part of the ray's energy is lost.

With the help of the given charts, an approximate calculation of the distiller can be made; taking into consideration the non-stationary character of its operation, however, this is of no practical interest, since the non-stationary factor hardly influences the average capacity.

The following conclusions can also be drawn from the results of the calculation. It is difficult to increase the efficiency further than that given in the calculation. Even by increasing the thickness of insulation of the bottom, through which about 10 per cent of the energy is lost in the examined type, losses are

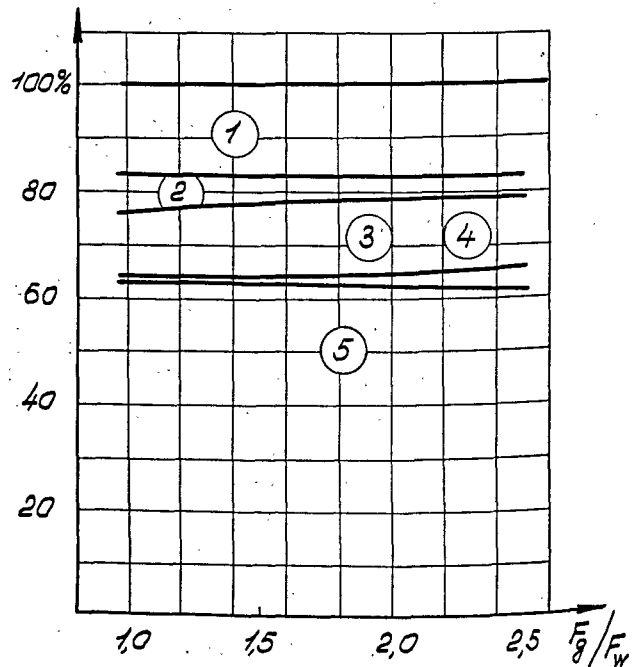


Figure 9. Influence of ratio of condensation surface  $F_g$  to water surface in tray  $F_w$  on heat balance



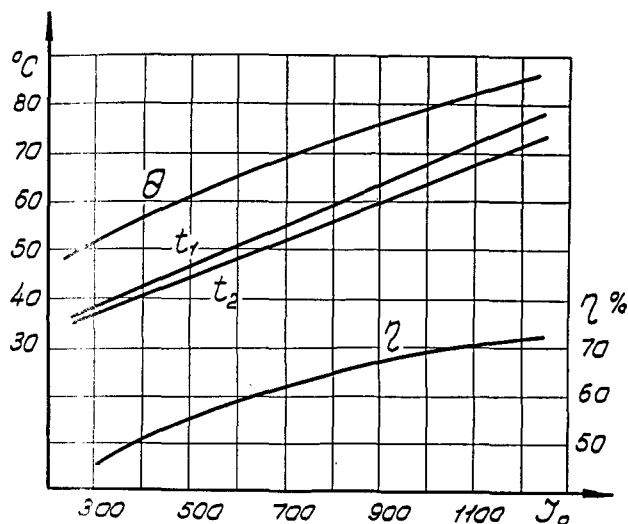


Figure 10. Influence of  $I$  on temperatures in still and efficiency

reduced by only 5-8 per cent. In view of the conditions in which the distiller operates, a glass with surfaces having low reflection cannot be used.

A distiller of the type shown in figure 14 was designed and investigated by K. Trofimov (7) and by M. Telkes (9). The evaporation of moisture takes place from a soaked fabric placed in a flat box in such a way that the bottom of the box is also a condensation surface. There are no losses by heat conduction through the bottom  $Q_2$ , which saves about 10 per cent of the energy falling on the distiller, but direct losses by radiation are doubled, since the heat-loss surface is twice as big (the fabric having two sides) as in a distiller with a tray. As a result, the heat balance will be somewhat worse (see heat balance charts). The fact that the fabric distiller has a specific capacity greater than that of a distiller with a tray can be explained by the fact that it is inclined and in non-tropical areas receives more

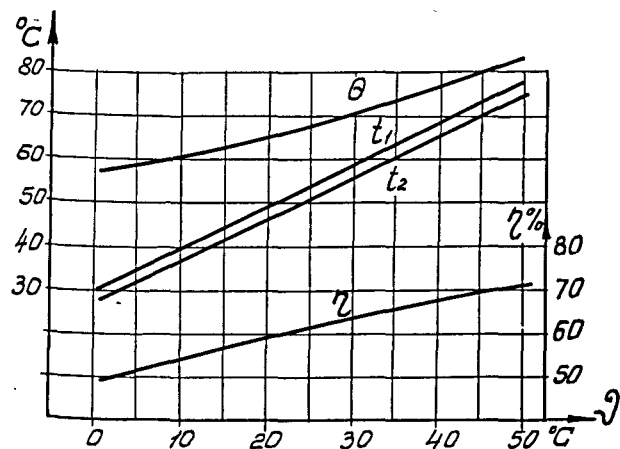


Figure 11. Influence of  $V$  on efficiency and temperatures in still

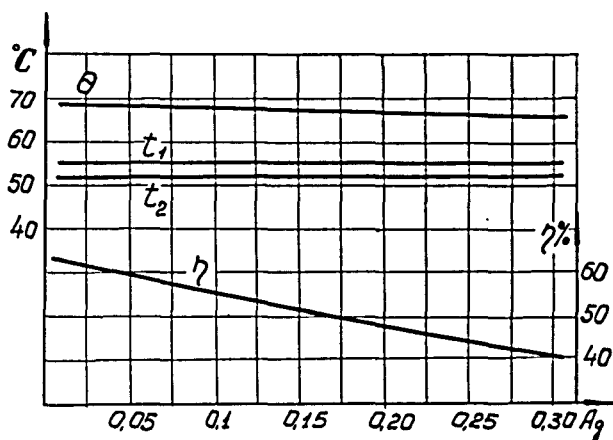


Figure 12. Influence of  $A_g$  on  $\eta$  and temperatures in still

energy per square metre than if placed horizontally. For Tashkent, for instance, the average amount of energy on an inclined surface ( $\alpha = 40^{\circ}$ ) is greater than on a horizontal plane.

When the radiation on the horizontal surface equals  $700 \text{ kgcal/m}^2\text{hour}$ , and the outside temperature is  $25^{\circ}\text{C}$  and there is a light wind, the temperature of the water is about  $70^{\circ}\text{C}$  and the temperature of the glass  $t_1 = 60^{\circ}\text{C}$ .

Good technical results can be obtained from a distiller, however, if it is correctly designed and sufficiently carefully built and if operated properly. On the basis of conducted experiments, the following recommendation could be made.

In designing a distiller, it is necessary to ensure that the tray be as little as possible in the shadow of the structure. The angle at which the glass is inclined should be sufficiently large for the drops of the condensate to slip down the glass and not fall back

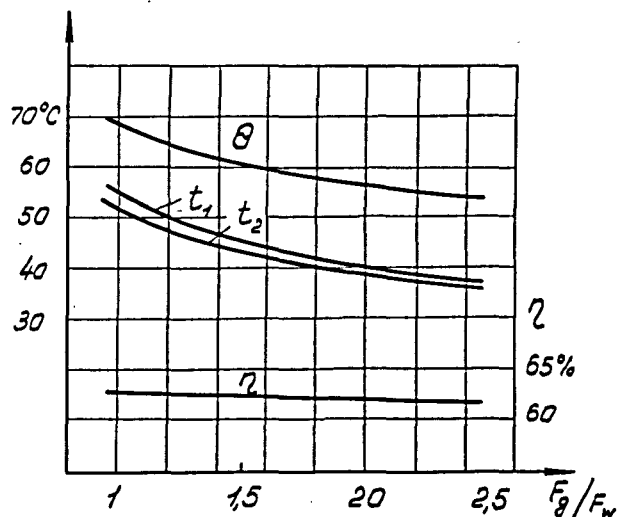


Figure 13. Influence of  $F_g/F_w$  on efficiency and temperature in still

$\theta$  = temperature of steam-air mixture and water in distiller;  $t_1, t_2$  = temperatures of inner and outer surface of glass;  $\eta$  = efficiency of still (per cent)

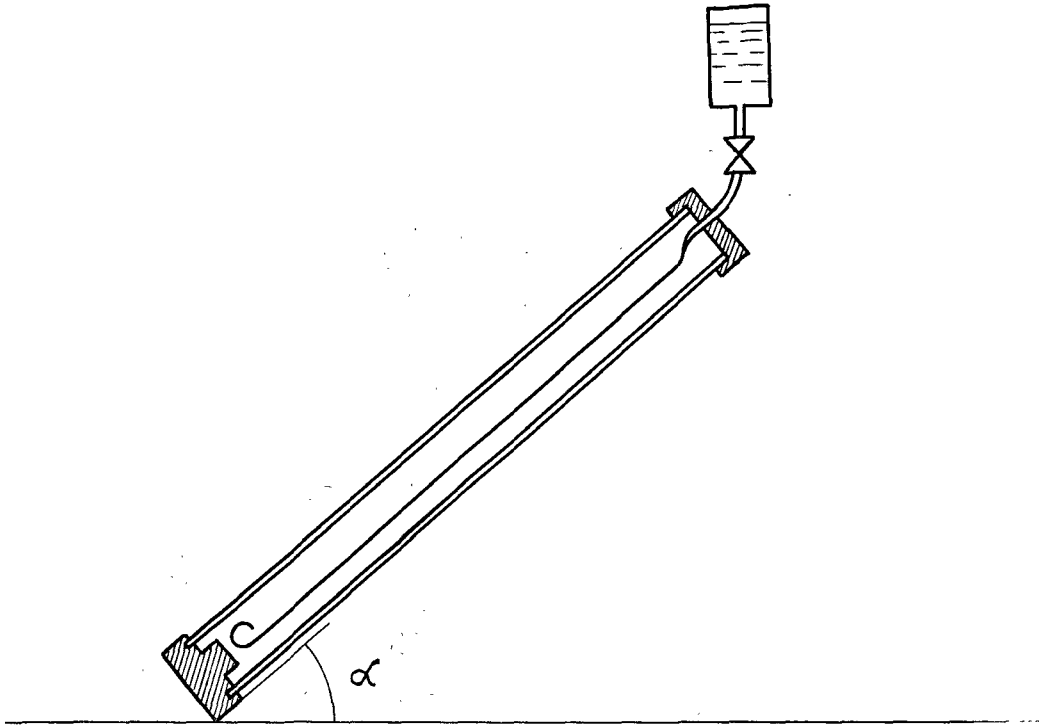


Figure 14. The scheme of the still with soaked fabric

into the tray. The glass or transparent plastic should have a surface which can be sufficiently well moistened, otherwise a mist will form on the surface and not allow the rays through; the insulation of the bottom must have a low heat-conductivity; no moisture should be allowed to fall on it, as it would lessen the heat insulator properties of the material. Special attention should be paid to sealing the chamber of the distiller hermetically. Experiments conducted in such a way that a balance between the evaporated and condensed water is formed, as well as calculations, showed that even the slightest cracks in the upper part of the distiller lead to greater losses—even as a result of natural pressure—of the steam-air mixture. These losses are greatly increased when the wind “blows out” the mixture, as then the distiller practically stops working. These losses can be computed. A number of authors point out the need to drain regularly the salt solution in the tray, in order to prevent the salt falling out on the bottom, since a salt layer would lessen the absorption of radiant energy.

Since the examined type of distiller has practically been brought up to a maximum efficiency, the cost of the distilled water can be reduced further only by cutting building costs.

The main direction which this work should take in our opinion is the use of films and plastics, and the mass production of standard boxes. Recently, a number of successful works have been carried out with the use of transparent plastic (15-18).

We believe it would be useful also to make the following points.

The idea of creating a distiller in which the water would be heated to a temperature of 50-80°C in the hot box and in which the condensation of the steam from the vapour-air mixture would take place in a separate condenser has been put forward in different forms. However, the attempts to construct such an installation ended in failure, as the specific capacity of the distiller was negligible. This is easily explained: the circulation of the vapour-air mixture in the heater-condenser is difficult, the speed of the diffusion of steam from the heater to the condenser being absolutely insufficient for the normal work of the distiller. Moreover, there exist additional

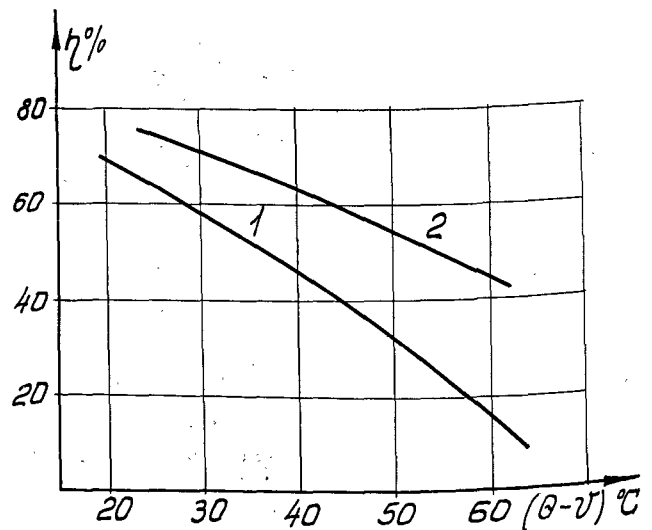


Figure 15. Efficiency of water-heater (1) and still (2)

heat losses which are absent in the simplest types of distillers.

It is true that in the hot box all the heat conveyed through the glass into the ambient air is lost, while in the distiller a large part of the heat passing through the glass is the heat of condensation, which has to be transferred in accordance with the working scheme of the ideal non-regenerative distiller. It is sufficient to draw attention to the fact that the efficiency of the hot box is lower than the efficiency of the simplest distillers, even though the water in them has the same temperature (figure 15).<sup>3</sup>

The question of design is completely simplified if the vapour is obtained in a separate boiler at a pressure higher than atmospheric. Then this steam, which does not contain air, easily passes to the condenser, where it is condensed. However, heaters of the hot-box type are of no use for obtaining steam by using solar energy. It is necessary to use solar boilers with devices for concentrating rays (mirrors). If the principle of the regeneration of heat is not used, then distillers of this type will be more expensive than hot-box distillers and more complicated in operation.<sup>4</sup>

### Regenerative distillers

The process of desalting water can be conducted in a much more economic way from the point of view of the energy used if the principle of regeneration of heat is used in distilling. It is true that in the distillers examined above, almost all the heat spent on the evaporation of water is then (during the condensation of the steam) let out into the ambient air and thus lost.

In regenerative stills, however, a considerable part of the heat of the condensation is used to heat. While in stills without regeneration of heat, about one kg of condensate is obtained from one kg of steam, in stills of the regenerative type, the weight of the produced distilled water is several times greater than the quantity of steam used.

The more stages of evaporation (evaporators) a still has, the higher its capacity with the same expenditure of steam (figure 16). The fall in temperature in each of the evaporators of the still should

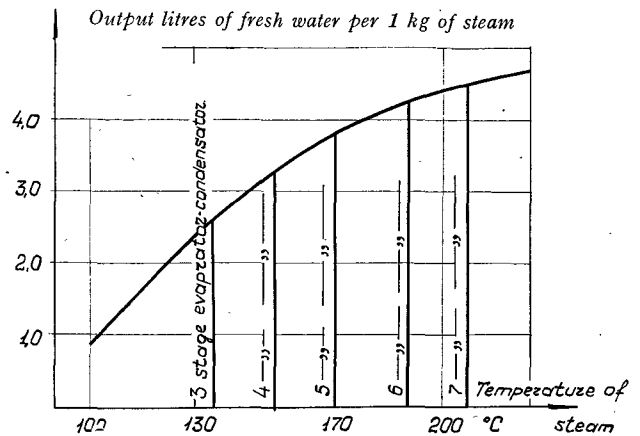


Figure 16. Quantity of condensate obtained from 1 kg of steam depending on number of stages of still

be  $\Delta t = 15-25^\circ\text{C}$ . At smaller  $\Delta t$ , the size of heat-exchange surfaces increases. For concrete conditions, several variants can be calculated and the most profitable number of stages chosen. For solar stills, the number of stages should be from 5 to 8.

The calculations of the evaporation installations have been well worked out.

In 1952, our Helio-laboratory tested a three-stage still (figure 17). The steam for it was obtained from a solar boiler, which consisted of a paraboloid mirror 10 m in diameter. In the focus of the mirror a boiler was placed, which produced about 50-60 kg of steam an hour; the steam pressure during the tests was about 6 atm. The still gave, in the month of June, about one ton of distillate a day. The efficiency of the solar boiler was equal to 60 per cent (12).

For economic estimates of the cost of the fresh water, one could give the efficiency of the different types of solar boilers at different steam pressures and different temperatures of the ambient air.

Solar boilers with paraboloid mirrors (even if the mirrors are rough and give a concentration of rays of at least  $K = 200-300$ ) have an efficiency which depends very little on the pressure of the steam (within the limits of required pressures) and on the temperature of the ambient air, since the heat loss from hot surfaces of the solar boiler in these installations is insignificant. However, in boilers having concentrating mirrors of a parabo-cylindrical shape, the efficiency depends noticeably on the pressure (temperature) of the steam obtained in it.

The heat balance of the solar boiler with concentrating mirrors can be represented by the following simplified equation:

$$\begin{aligned}
 IF_{\text{mir}} &= (i_{st} - i_w) B + (1 + R_{\text{mir}}) IF_{\text{mir}} + \\
 &+ (1 - A_b) IR_{\text{mir}} F_{\text{mir}} + F_b E_b \cdot 4.95 \left[ \left( \frac{T_b}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_o}{100} \right)^4 \right] + \\
 &+ \alpha \text{ conv} (T_b - T_o) F_b + \frac{1}{\alpha} \sum_{\lambda} \frac{1}{\delta} (T_b - T_o) F_b
 \end{aligned}$$

<sup>3</sup> The efficiency of the water-heater with one glass at a temperature  $t = 55^\circ\text{C}$  in figure 15 has been taken from HotteI's paper (19).

<sup>4</sup> Veynberg (12) has constructed and made a regenerative distiller, working at atmospheric pressure, which gave up to 1.84 litres distilled water per 1 kg of vapour at atmospheric pressure.

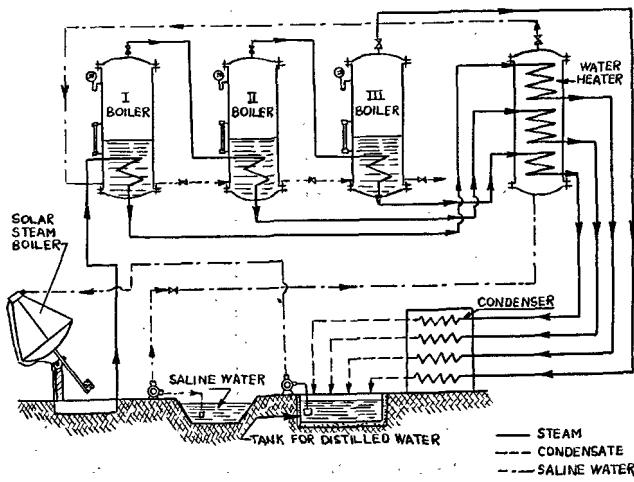


Figure 17. Tashkent distilling installation with three-stage still

The components of the equation (from left to right) are as follows: solar radiation energy received by mirror, useful heat of steam, radiant energy losses as a result of imperfect reflection from mirror surface, radiant energy losses due to imperfection of absorption surface of boiler, heat loss from boiler by means of radiation, heat losses from boiler by convection, losses of insulated surfaces of the boiler.

In this case :

- $I$  = direct solar radiation on surface, perpendicular to solar rays,  $\text{kcal/m}^2\text{hour}$
- $i_{st}, i_w$  = enthalpy of vapour and water,  $\text{kcal/kg}$ .
- $B$  = capacity of boiler per hour,  $\text{kg/hour}$
- $R$  = resulting reflection coefficient of mirror, can be taken to be equal for: electropolished alumina mirror 0.75-0.9 (depending on thickness of oxide film); backside silvered glass mirror 0.75-0.87
- $A_b, \epsilon_b$  = absorptivity and blackness of boiler. For ordinary blackened surfaces  $A_k = \epsilon_b$  can be taken to equal 0.85-0.95; for selective, specially processed surfaces,  $E = f(T_b)$  (20, 21)
- $F_{mir}$  = surface of mirrors (or, to be more exact, the projection of mirror to a surface perpendicular to the sun's rays) concentrating rays,  $\text{m}^2$
- $F_b$  = illuminated surface of the boiler,  $\text{m}^2$
- $\alpha_{conv}$  = heat transfer coefficient.

When the geometrical concentration of rays is more than  $K = 30$ , the surface of the boiler is not screened by glass from convective losses. For approximate calculations, one can take 'at small wind velocities  $\alpha_{conv} = 10\text{-}20 \text{ kcal/m}^2\text{hour} \cdot ^\circ\text{C}$ .

For boilers with a paraboloid mirror, one can take (22) for free convection

$$Nu_m = 0.62 (Gr)_m^{0.25}$$

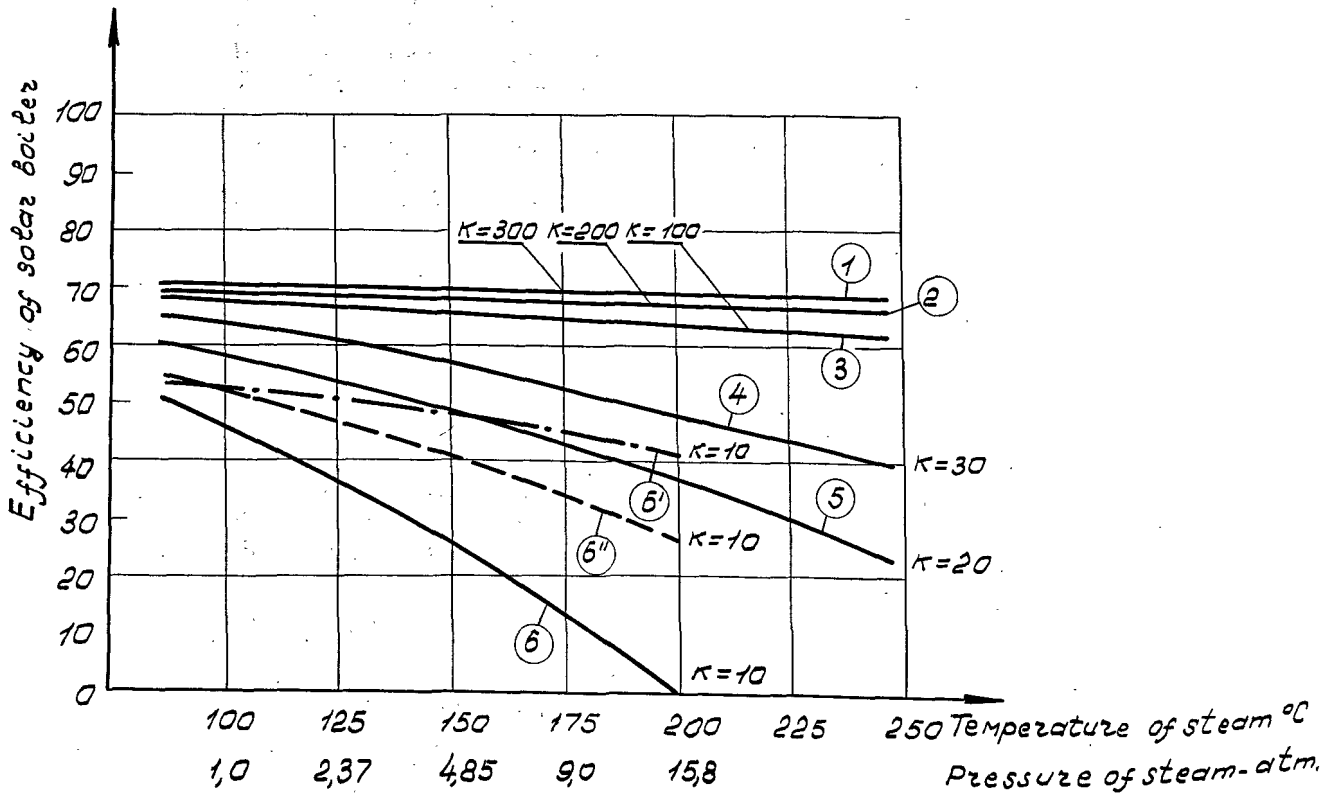


Figure 18. Efficiency of solar boilers

1, 2, 3 = boilers with paraboloid mirrors; 4, 5, 6 = with paraboloid-cylindrical mirrors; 6' same as 6, but surface of the boiler has selective painting (to reduce radiation losses) and glass top (to reduce convection losses); 6'' same as 6', but without glass top

and for forced convection

$$Nu_f = 0.136 (Re)_{f,0.73}$$

$$\Delta = \left( \frac{1}{\alpha} + \sum \frac{\delta}{\lambda} \right) \text{ is the heat resistance to the transfer}$$

of heat from the surface of the boiler through the heat insulation to the ambient air; depending on the construction, it can be taken to equal 0.5-2.0 kcal/m<sup>2</sup>hour°C ( $\alpha$  = coefficient of heat transfer into ambient air,  $\delta$  = thickness of insulation layers,  $\lambda$  = heat conductivity coefficients).

Paraboloid mirrors of a searchlight type, having an aperture angle of 100°-120°, give the average coefficient of geometrical concentration  $K = 10,000$ . However, for solar boilers it is quite sufficient to have  $K \cong 200-400$ , that is the mirrors can be made roughly and consequently comparatively cheaply.

Precisely made parabo-cylindrical mirrors can give a  $K = 100$ . If they are made of sheet metal, for instance polished aluminium (by affixing sheets to dummies), they give a concentration which does not exceed  $K = 20-30$ .

The calculations and some experiments show that the steam output of a solar boiler with a paraboloid mirror practically does not depend on the pressure of steam (from  $p = 1$  to  $p = 30$  atmospheres). It is therefore obviously feasible to obtain steam with a pressure of 20-30 ata.

When parabo-cylindrical mirrors are used, the capacity of the solar boiler is reduced and it is necessary to calculate the most advantageous pressure.

On the basis of calculations, figures 17-19 were drawn. Figure 19 shows the capacity of stills with different solar boilers.

The following conclusions can be drawn from these figures :

(a) The stills having boilers with paraboloid mirrors can give a specific capacity of up to 3.4 litres of fresh water an hour per square metre of mirror surface; 6-9 stage stills should be used with an initial steam pressure of 12-30 ata.

(b) The stills having boilers with parabo-cylindrical aluminium mirrors attached to dummies can, if accurately made ( $K = 30$ ), give a specific capacity of up to 2.2 litres per hour per square metre of mirror surface (stills having 4-5 stages should be used).

The stills having boilers with non-accurately shaped parabo-cylindrical mirrors ( $K = 10$ ) cannot yield more than 1 litre/m<sup>2</sup>hour and their use is unfeasible, since they cannot compete with the simpler types of stills — the hot-box type. The capacity of these boilers can be increased if glass tops are used which reduce convection heat losses, and with selective surfaces that cut down radiation losses (figure 19, curves 6', 6'').

(c) The choice of a type of boiler (with a paraboloid mirror or parabo-cylindrical mirror) should be made on the basis of comparative costs of these boilers. The following boilers should be examined in making the choice (preliminary calculations) : boiler with a paraboloid mirror  $K = 300-200$  and

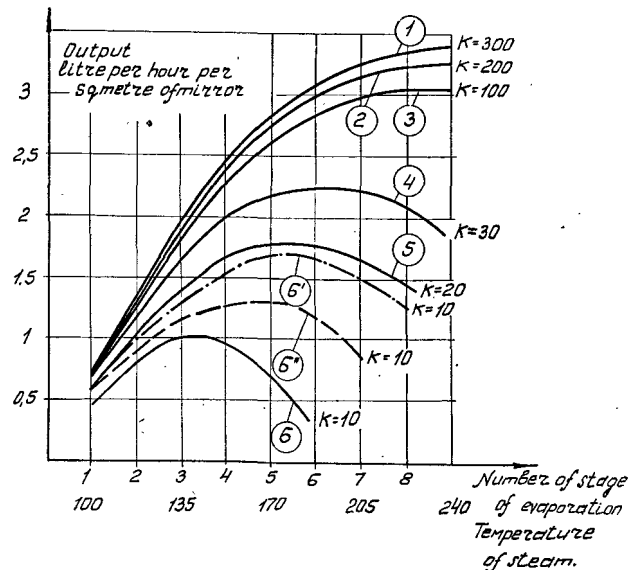


Figure 19. Specific capacity of solar stills depending on number of stages of distillation and of boiler design

a 6-9 stage still using steam of 10-30 ata; and boiler with a parabo-cylindrical mirror  $K = 30$  with a 4-5 stage still using steam at a pressure of 5-9 ata.

In the first case, the specific capacity of the installation will equal about 3 litres per m<sup>2</sup> of mirror an hour, and in the second case, about 2 litres/m<sup>2</sup> an hour.

### Obtaining fresh water in large quantities

The methods for distilling water described above can also be used on a large scale. However, in that case it may be more advantageous to use another system for obtaining fresh water. Thus, for instance, the steam could be produced in a big solar boiler of a type described earlier (23); in this case, the steam should first be used in a turbine to generate electricity with a counter-pressure of 2-3 ata, and the spent steam should be switched over to the still. The steam could also be used in a condensation turbine and the generated electricity could be used to distil water by means of electro dialysis.

The question of choosing a concrete scheme for the variant mentioned is far too complicated. Detailed technical and economic calculations are necessary before giving any general recommendations. That such a scheme could be economically profitable seems clear from the fact that if a slight reduction of the salt content in brackish water is needed, then the expenditure of electricity is very small.

To make some estimate of the possible results, let us examine the case in which a big solar installation described in (23) is taken as the power unit. We shall mention some general characteristics of this project prepared at the Krzhizhanovsky Institute. The solar station will consist of a tube-screen boiler 135 m<sup>2</sup> irradiated by concentrated sun rays reflected

from 1 300 flat mirrors. The total surface of the mirrors will be 20 000 m<sup>2</sup>.

For conditions prevailing in Tashkent, where the annual energy of direct solar radiation to a surface perpendicular to the rays equals 1 700 000 kcal/m<sup>2</sup> year, the following results could be given.

(a) If the solar boiler alone is used and its steam is transmitted to an 8-9 stage distiller, then the yearly

output of such an installation would equal about  $1.6 \times 10^5$  tons of distillate.

(b) If the steam from the solar boiler is used in a 2 500 kW condensation turbine to produce electricity and the electricity is used for the electro dialysis of water, it would be possible to obtain the following quantities of fresh water containing about 350 mg of salts per litre (24) :

Initial salt-content mg/litre . . . . .	885	4 635	10 000	35 000
Annual yield of installation in tons of water, salt content, 350 mg/litre . . . . .	$7 \times 10^6$	$1.8 \times 10^6$	$0.85 \times 10^6$	$0.28 \times 10^6$

(c) The capacity of the hot-box type still with an area of 20 000 m<sup>2</sup> would be equal to 17 200 tons of distillate per year.

### References

- Harting, J., *Apparatus for Solar Distillators*, London, 1883.
- Richerd, J., *La Nature*, no. 2804; *Recherches et Inv.*, no. 173, 1929.
- Maurian, Ch. and Brazier, C., *Recherches et Inv.*, no. 654, 1927; No. 173, 1929.
- Ginestous, M., *Bull. Doc. Gener. l'Agriculture*, 1928; *Revue Agricole de l'Afrique du Nord*, 1928.
- Veynberg, B., *Priroda, Nature*, No. 2, 1930.
- Veynberg, B. V., *Solnetchnye opresnatelye* (Solar stills), Leningrad, 1933.
- Trofimov, K., *Ispolzovanie solnetchnoi energii* (The use of solar energy). Tashkent, 1935.
- Tekuchev, A., *Trudy Usbekskogo Universiteta*, no. 59: Samarkand, 1935.
- Telkes, M., *Proceedings, World Symposium, Applied Solar Energy*, Phoenix, Arizona, 1955; *Ind. and Eng. Chemistry*, May 1953, p. 1108.
- Gomella, C., *Terres et Eaux*, 3<sup>e</sup> trimestre, 1955; 2<sup>e</sup> trim., 1955.
- Nebbia, G., *Geofisica e Meteorologia*, 1, 100 (1953); 2, 50 1954; *Ricerca Scientifica*, 25, 1443 (1955).
- Sbornik, *Ispolzovanie solnetchnoi energii* (The use of solar energy), No. 1, 1957; No. 2, 1960, Acad. Sc., U.S.S.R.
- Brdlik, P., *Kondensacia vodjanogo para, Inzhenerno-fizichesky journal*, vol. 11, No. 3. Minsk, 1959.
- Parmelly, D., *Heating, Pipe and Air Cond.*, Oct.-Nov. 1945.
- Daniels, Farrington and Duffy, J., *Solar Energy Research*, 1955. Madison, Wisconsin.
- Howe, E., *Trans. Conf. on Use of Solar Energy*, Tucson, Arizona, 1955, vol. 3, p. 159.
- Salam, E. and Daniels, F., *Solar Energy*, VIII, No. 1, 1959.
- Edlin, F., *Du Pont Mag.*, 53 (2), Apr.-May, 1959.
- Hottel, H., *Trans. Conf. on Use of Solar Energy*, Tucson, Arizona, 1955, vol. II.
- Tabor, H., *The Use of Solar Energy*, vol. 11, Ser. A, 1955. University of Arizona.
- Sbornik, Ge-Sing-she., *The Use of Solar Energy*, Acad. Sc. USSR, no. 3.
- Hunzaria., *Journal Teploenergetica*, 8, 1957, Moscow.
- Baum, V., Aparisi, R. and Garf, B., *Journal, Solar Energy*, No. 1, 1957.
- Heister, N. and Phillips, R., *Electromembrane Ion Exchange, Chemical Engineering*, No. 10, 61 (1954).

## QUELQUES EXPÉRIENCES SUR LA DISTILLATION SOLAIRE DE L'EAU A PETITE ÉCHELLE

L. Fontán et J. A. Barasoain \*

La demande croissante d'eau potable de par le monde entier milite en faveur de l'exécution d'un effort technique et économique concerté, visant à mettre au point des installations de conversion d'eaux saumâtres en eaux douces. Il convient de signaler, dans cet ordre d'idées, le financement, par le Département de l'Intérieur des États-Unis, d'un programme de recherches et de réalisation de centrales pilotes de conversion d'eau salée (1).

Dans les zones arides et semi-arides, cette nécessité prend un caractère vital, car une abondante conversion d'eau saumâtre en eau douce à faible prix aurait des répercussions considérables sur le niveau de vie, partant sur le progrès économique et social.

Dans les pays, tels que l'Espagne, qui disposent d'une abondante énergie solaire et dont les côtes sont longues, pays qui, de surcroît, souffrent d'un déficit d'eau douce et disposent de peu de sources d'énergie, le problème consistant à obtenir de l'eau douce à partir de l'eau de mer acquiert un intérêt de tout premier ordre ainsi, de même, que dans certaines régions intérieures des îles et du désert du Sahara, où certains puits donnent des eaux saumâtres.

Parmi les procédés actuellement à l'étude (2) et en voie de perfectionnement dans le but de résoudre ce problème, figure celui qui prévoit la mise en œuvre de l'énergie solaire qui, outre le fait qu'elle est gratuite (3), est la source d'énergie naturelle des grandes régions arides et semi-arides.

Les besoins d'eau douce, en Espagne, s'étendent aux domaines ménager, municipal, industriel et agricole. Nous croyons que, pour les pays présentant des caractéristiques telles que le nôtre, la distillation solaire trouverait ses applications, mais à une échelle réduite, car il faut tenir compte de la grande

surface des terrains dont il faudrait disposer pour réaliser des installations de grande production.

Les sommes afférentes aux frais d'eau douce à des fins ménagères et autres sont très exagérées dans certaines zones, précisément de la côte, abondamment ensoleillée, de l'Espagne péninsulaire et africaine. En voici un exemple : dans certains centres urbains du sud-est de la péninsule, l'eau potable se paie plus d'un dollar par m<sup>3</sup>; aux îles Canaries, l'eau qui sert à l'arrosage atteint le prix de 0,20 dollar par m<sup>3</sup> et, dans certaines de ces îles, il est nécessaire de la transporter par voie maritime pour satisfaire les besoins les plus élémentaires de la population.

Pour les raisons indiquées ci-dessus, il est important, en Espagne, de faire face aux besoins des petits consommateurs, à ceux des familles et des communautés de peu d'importance, pour des fins ménagères. C'est la raison pour laquelle nous nous pencherons sur le problème de la distillation de l'eau saumâtre à petite échelle (4).

### L'énergie solaire en Espagne

Le service météorologique espagnol enregistre la durée d'insolation depuis nombre d'années au moyen d'un réseau étendu d'observatoires, et il a mis au point la carte d'isohélie que donne la figure 1, exprimées en heures de soleil par an.

Aux Canaries, on enregistre, dans certains lieux tels que Izaña (Tenerife), situé sur les pentes du volcan Teide, des valeurs de 3 600 heures par an et, sur la côte d'Afrique occidentale, l'insolation atteint 3 103 heures à Villa Cisneros.

Il ressort de l'examen de ces données qu'il y a plus de 3 000 heures d'insolation dans la partie méridionale de la péninsule. On enregistre des chiffres tout à fait analogues en Afrique.

\* Comisión Nacional de Energías Especiales, Madrid.

Tableau 1

Lieu	Mois		Calories cm <sup>-2</sup> /jour <sup>-1</sup>		
	Période	Maximum jour	Minimum jour	Moyenne quotidienne	
Las Rozas (Madrid) . . . . .	39	716	16	376	
Badajoz . . . . .	31	125	28	372	
Almería . . . . .	46	698	30	406	
Séville . . . . .	37	711	33	375	

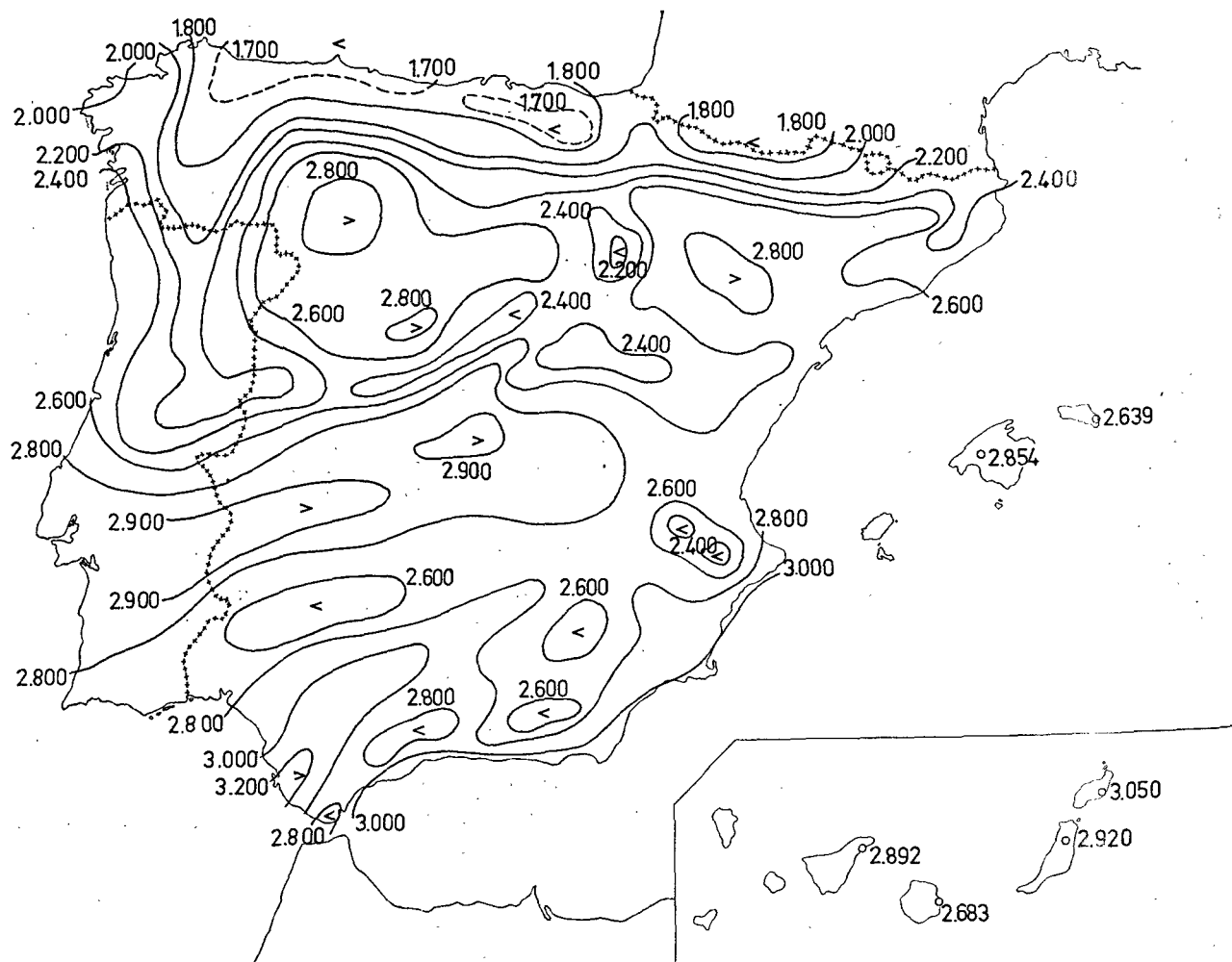


Figure 1. Carte d'insolation (période 1931-1959)

La Commission nationale des sources spéciales d'énergie a commencé l'installation d'un réseau d'observatoires d'énergie solaire en se servant, comme matériel enregistreur, de l'actinographe de Robitzsch. Les figures 2 et 3 donnent les variations annuelles de l'énergie solaire enregistrée en quatre lieux, sous forme du rayonnement solaire quotidien moyen par mois que reçoit une surface horizontale.

Le tableau 1 donne les valeurs extrêmes enregistrées pendant toute la période d'observation, ainsi que l'énergie quotidienne moyenne.

### Expériences sur la distillation

On a choisi comme centre d'expériences un lieu situé à 20 km de Madrid et nommé Las Rozas, qui est bien dégagé et dont les statistiques solaires ont été données à la figure 2 et au tableau 1.

Nous avons fait des expériences avec 10 types différents de distillateurs, dont certains étaient plus ou moins classiques, tandis que d'autres repré-

sentaient des innovations faites dans le but d'étudier divers aspects du problème de la distillation.

Les figures 4 et 5 montrent certains des groupes de distillation que nous sommes en train de soumettre à des expériences à notre centre de Las Rozas.

Les alambics représentés schématiquement aux figures 6, 7 et 8 sont d'un modèle classique, fabriqués avec des matériaux nationaux, sauf le dernier dont la surface transparente est en composition plastique « Mylar » (5).

L'alimentation de ces alambics se fait au moyen d'un réservoir d'une capacité d'un m<sup>3</sup>, par l'intermédiaire de régulateurs à flotteur qui maintiennent constant le niveau de l'eau dans les distillateurs. L'eau qu'ils contiennent noircit, à cause de la présence d'aniline dans le bain et, au surplus, le fond de la cuve est peint en noir.

Nous disposons d'assez de jours d'observation pour les trois centres, et il nous semble opportun de faire figurer à ce mémoire une étude du comportement du matériel pendant la durée de sa période



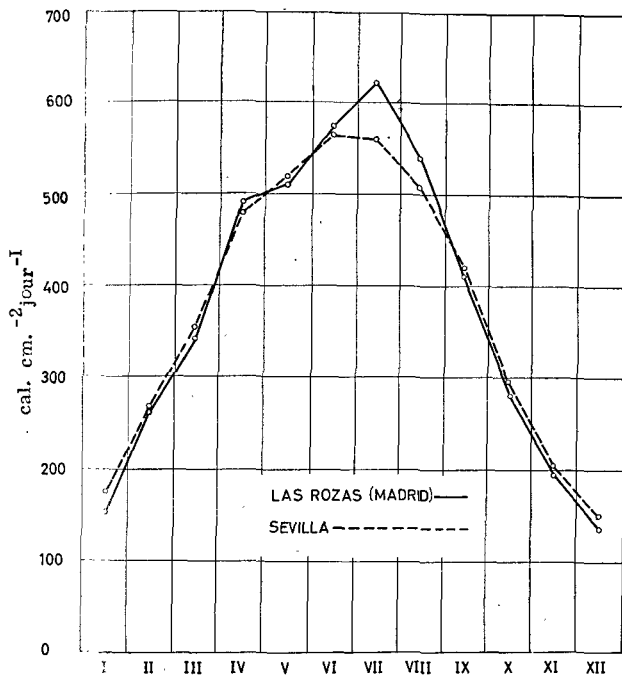


Figure 2. Courbe du rayonnement solaire (Las Rozas et Séville)

de fonctionnement qui, d'autre part, est de nature à fournir assez de données sur le rayonnement solaire.

Les figures 9, 10 et 11 indiquent la marche de la distillation quotidienne moyenne pour chaque mois pendant la période de fonctionnement, en litres de production pour chaque distillateur ou alambic. On indique également les moyennes quotidiennes des données correspondantes, pour chaque mois,

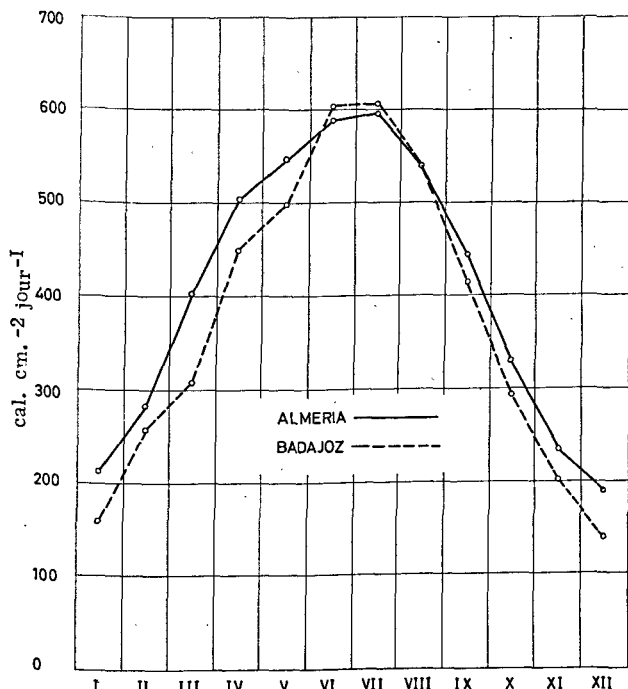


Figure 3. Courbe du rayonnement solaire (Almería et Badajoz)

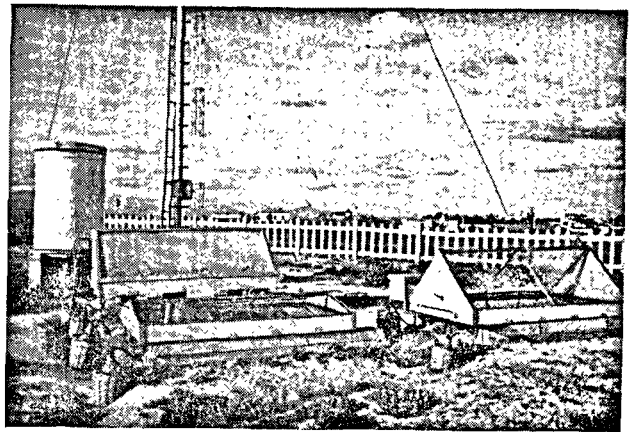


Figure 4. Photographie des alambics 1, 2 et 3

sur l'énergie solaire totale mesurée sur une aire horizontale, c'est-à-dire précisément des mêmes intervalles de temps que ceux qu'on a considérés comme normaux pour le fonctionnement de chaque distillateur.

Les courbes ont été obtenues à partir des statistiques établies d'après des observations quotidiennes sur la distillation et le rayonnement, en éliminant de l'une et l'autre les jours de fonctionnement anormal des alambics, soit pour révision, soit en raison d'avaries.

Nous n'avons pas observé le rayonnement pendant la période comprise entre le 13 juillet et le 23 octobre 1960, mais, pour cette période, on fait néanmoins figurer les données ayant trait à la distillation.

Comme on verra aux figures indiquées, on peut apprécier d'une manière générale le parallélisme entre les variations du rayonnement et celles de la distillation. Il y a quelques points, toutefois, sur lesquels il manque une correspondance claire. En principe, nous les attribuerons à des variations de température ambiante et des vents.

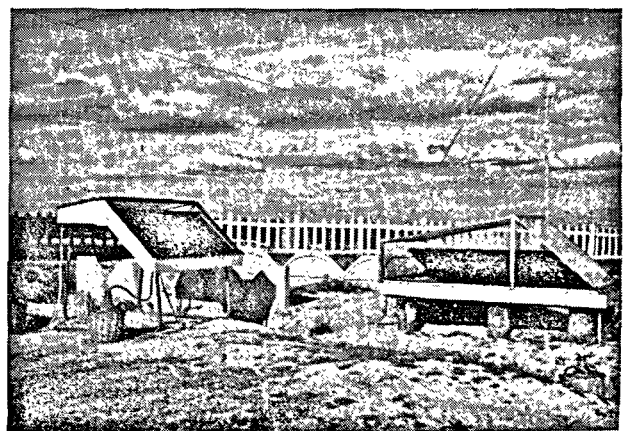


Figure 5. Photographie des alambics 4 et 5

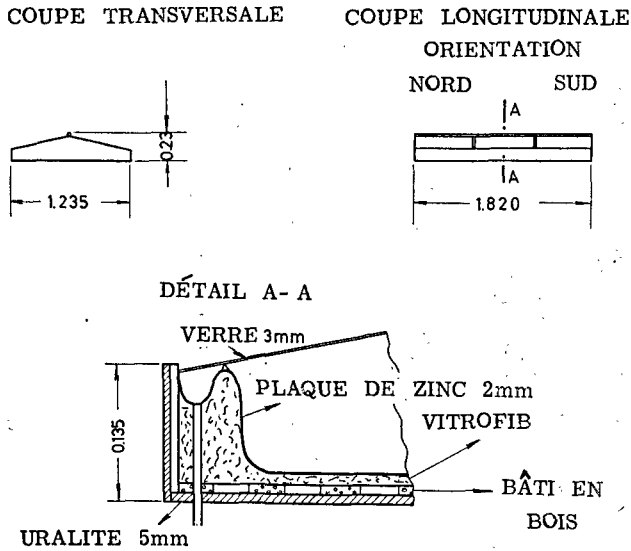


Figure 6. Distillateur à énergie solaire n° 1, incliné à 10°/10°, en verre

Surface ensoleillée transparente en projection horizontale	2,05 m <sup>2</sup>
Surface d'évaporation	2,00 m <sup>2</sup>
Surface de condensation	2,44 m <sup>2</sup>
Volume d'air humide	0,248 m <sup>3</sup>
Dimensions horizontales maxima	1,82 × 1,24 m
Hauteur maxima	0,255 m

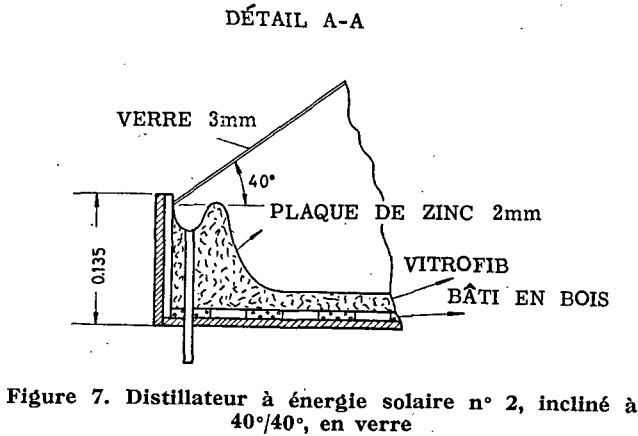
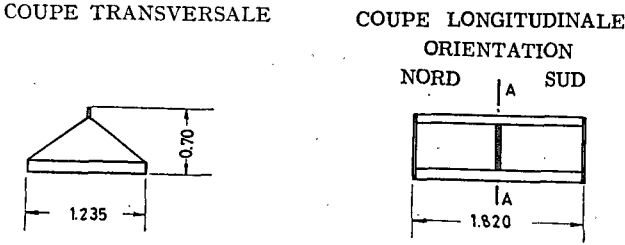


Figure 7. Distillateur à énergie solaire n° 2, incliné à 40°/40°, en verre

Surface ensoleillée transparente en projection horizontale	2,05 m <sup>2</sup>
Surface d'évaporation	1,96 m <sup>2</sup>
Surface de condensation	3,51 m <sup>2</sup>
Volume d'air humide	0,593 m <sup>3</sup>
Dimensions horizontales maxima	1,82 × 1,24 m
Hauteur maxima	0,70 m

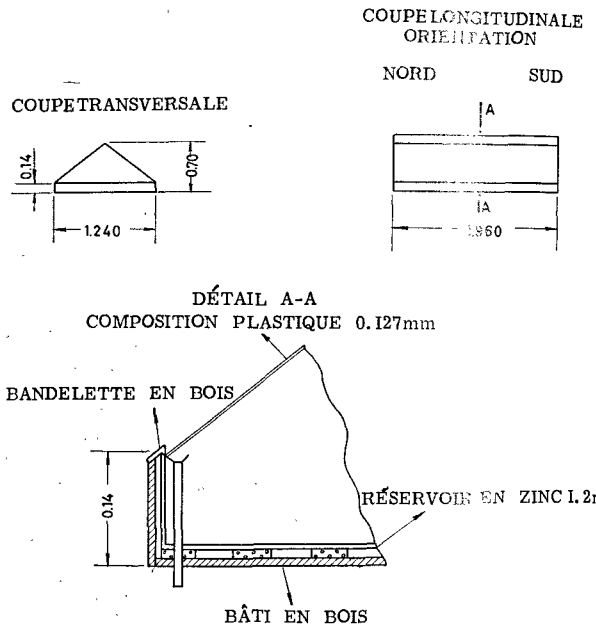


Figure 8. Distillateur à énergie solaire n° 3, incliné à 40°/40°, en composition plastique

Surface ensoleillée transparente en projection horizontale	1,94 m <sup>2</sup>
Surface d'évaporation	2,16 m <sup>2</sup>
Surface de condensation	3,51 m <sup>2</sup>
Volume d'air humide	0,593 m <sup>3</sup>
Dimensions horizontales maxima	1,97 × 1,25 m
Hauteur maxima	0,70 m

Il convient de souligner la production supérieure de l'alambic en verre incliné à 10° par rapport à celui qui n'est qu'à 40°. Le distillateur en composition plastique incliné à 40° donne une production légèrement supérieure à celle du cristal incliné du même angle, bien qu'il n'ait pas été possible d'obtenir que les gouttes formées sur la surface intérieure de la composition plastique descendent jusqu'au petit canal de récupération avec la même facilité qu'elles le font sur le verre, ce qui est provoqué en outre par une insuffisance appréciable de rayonnement par réflexion, avec perte d'eau parce que des gouttes tombent dans la cuve.

Les courbes des figures 12, 13 et 14 représentent l'importance de la distillation quotidienne en fonction du rayonnement journalier pour les alambics correspondants.

En partant des valeurs quotidiennes du rayonnement et de la production, on a établi des statistiques dans lesquelles on groupe les valeurs qui correspondent à cinq paliers de 50 calories cm<sup>-2</sup> jour<sup>-1</sup>, en commençant par le palier de 0 à 50 et en finissant avec celui de 700 à 750 calories cm<sup>-2</sup> jour<sup>-1</sup>. On a obtenu, de la sorte, les valeurs totales du rayonnement et de la production réalisées pour les jours de service correspondants. Ceci a donc donné les valeurs quotidiennes moyennes du rayonnement et de la production. Les valeurs moyennes trouvées ont servi à établir les courbes de production quotidiennes moyennes pour chaque distillateur.

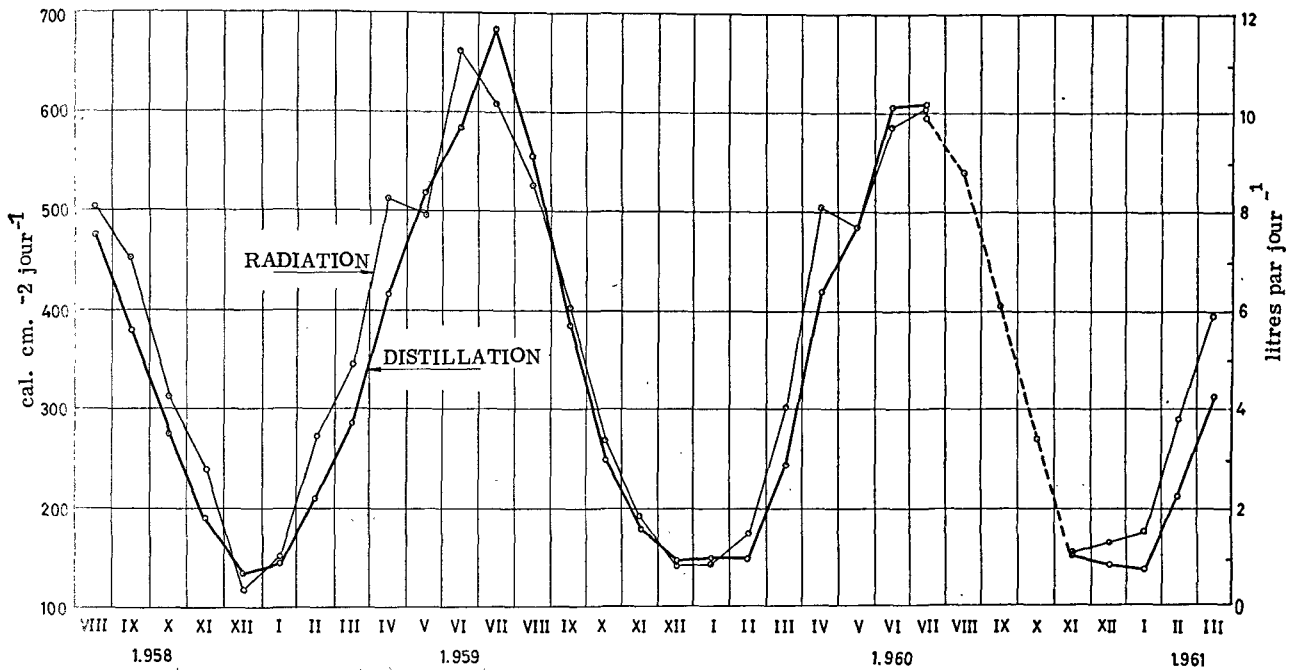


Figure 9. Évolution du rayonnement total et distillation quotidienne moyenne, à partir des données utiles pour chaque mois, avec l'appareil en verre incliné à 10°

Avec ces courbes, on peut prévoir approximativement le comportement de ces genres d'alambics en un lieu climatologiquement comparable et sur lequel on dispose de données sur le rayonnement solaire.

Les alambics représentés schématiquement aux figures 15, 16 et 17 correspondent à des modèles récemment construits et sur lesquels, jusqu'à présent, on ne dispose pas de données suffisantes pour réaliser une étude de leur production.

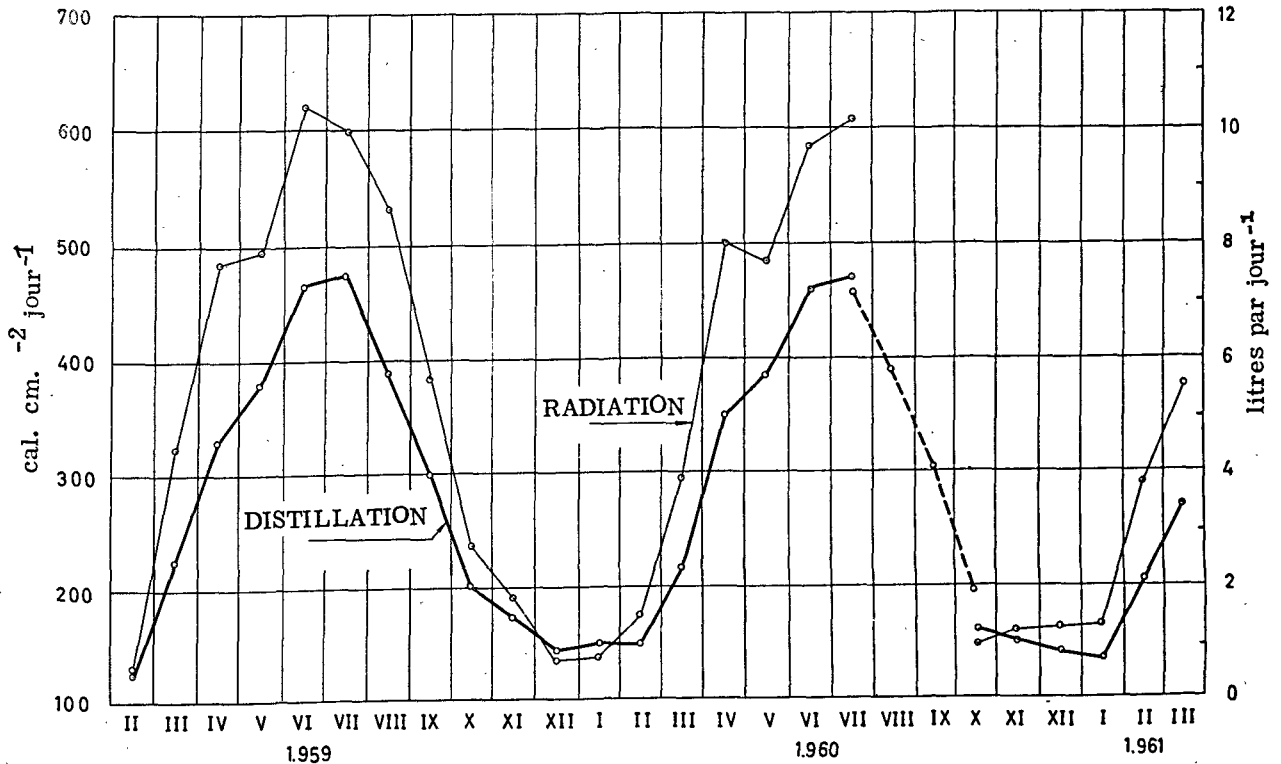


Figure 10. Évolution du rayonnement total et distillation quotidienne moyenne à partir des données utiles pour chaque mois avec l'appareil en verre incliné à 40°

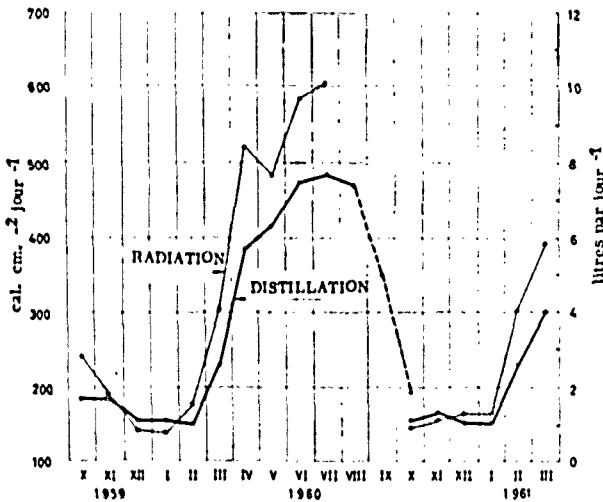


Figure 11. Évolution du rayonnement total et distillation quotidienne moyenne à partir des données utiles pour chaque mois, avec l'appareil en composition plastique incliné à 40°

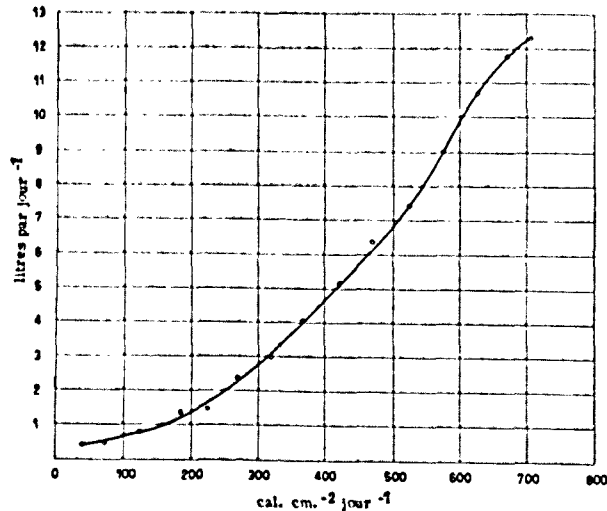


Figure 12. Courbe de production moyenne du distillateur en verre incliné à 10°

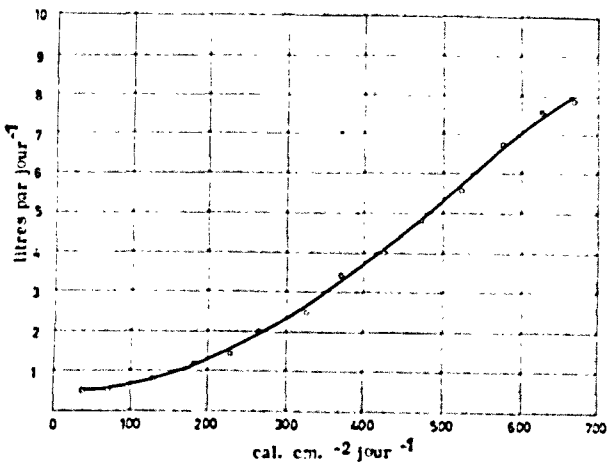


Figure 13. Courbe de production moyenne du distillateur en verre incliné à 40°

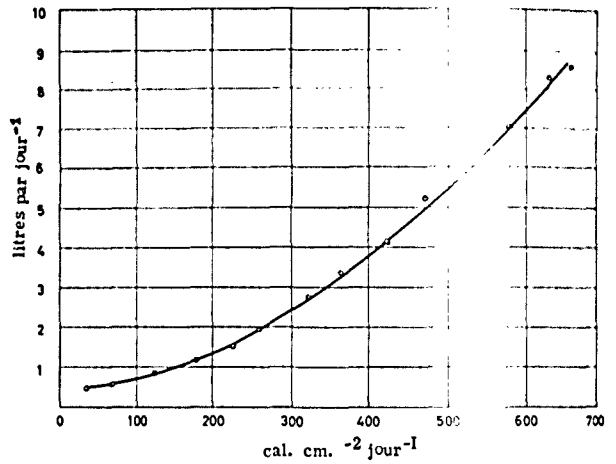


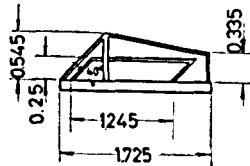
Figure 14. Courbe de production moyenne du distillateur en composition plastique incliné à 40°

Avec ces nouveaux alambics, dont on pourra apprécier l'aspect à la photographie (figure 5), on espère obtenir des données expérimentales suffisantes pour la date où la conférence se tiendra, car il faut prévoir des jours de bon rayonnement solaire pendant les mois de mai, juin et juillet.

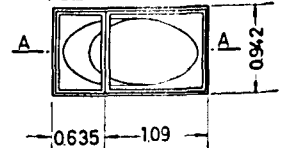
### Aspects économiques

L'utilisation de petits alambics à des applications ménagères milite en faveur de la réduction des frais de fabrication et d'entretien.

#### COUPÉ TRANSVERSALE



#### VUE EN PLAN



ORIENTATION  
NORD SUD

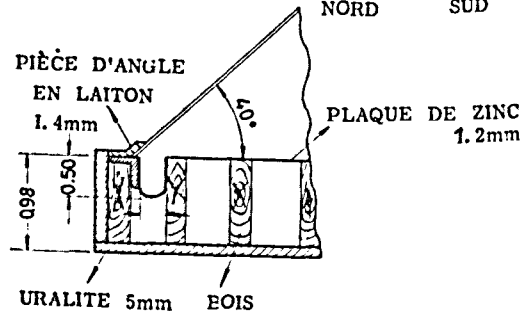


Figure 15. Distillateur à énergie solaire n° 4 à collecteur cylindrique à 40° avec couvercle en verre

Surface ensoleillée transparente en projection horizontale	1,483 m <sup>2</sup>
Surface d'évaporation	0,782 m <sup>2</sup>
Surface de condensation	3,6 m <sup>2</sup>
Volume d'air humide	0,409 m <sup>3</sup>
Dimensions horizontales maxima	1,73 × 0,95 m
Hauteur maximum	0,55 m

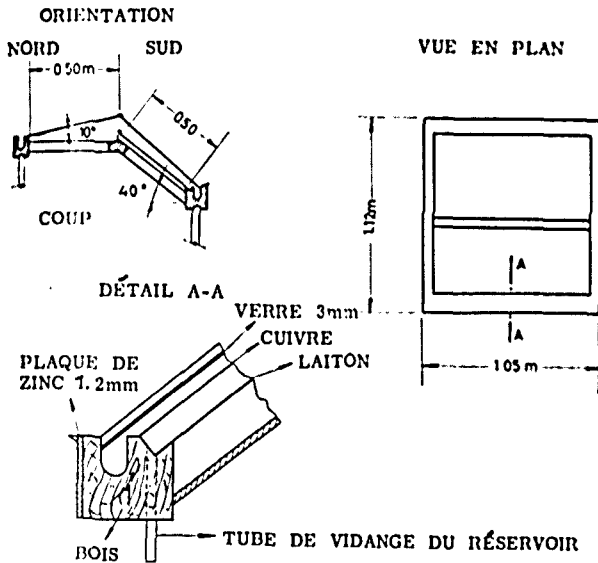


Figure 16. Alambic à énergie solaire n° 5 avec réservoir collecteur incliné à 40°

Surface ensoleillée transparente en projection horizontale	0,989 m <sup>2</sup>
Surface d'évaporation	0,5 m <sup>2</sup>
Surface de condensation	1,31 m <sup>2</sup>
Volume d'air humide	0,028 m <sup>3</sup>
Dimensions horizontales maxima	1,12 × 1,05 m
Hauteur maximum sans pieds	0,58 m
Hauteur maximum avec pieds	1,27 m

Le tableau 2 présente les données relatives à la production annuelle des alambics 1, 2 et 3, ainsi que les frais de matériaux et de main-d'œuvre pour

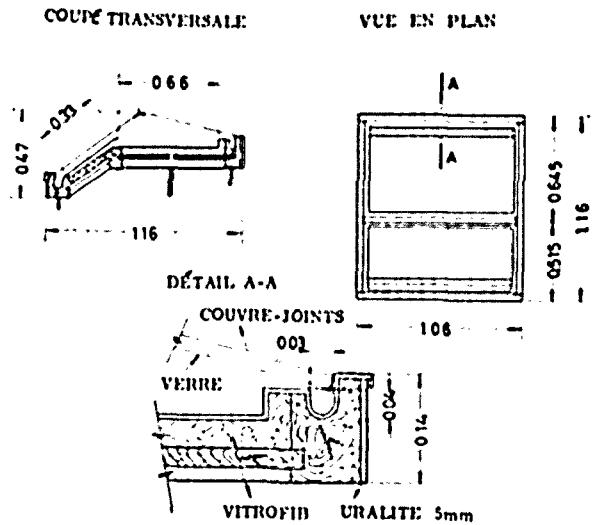


Figure 17. Alambic à énergie solaire n° 6 avec réservoir collecteur incliné à 40°

Surface ensoleillée transparente en projection horizontale	0,969 m <sup>2</sup>
Surface d'évaporation	0,665 m <sup>2</sup>
Surface de condensation	1,3 m <sup>2</sup>
Volume d'air humide	0,098 m <sup>3</sup>
Dimensions horizontales maxima	1,16 × 1,07 m
Hauteur maximum sans pieds	0,48 m
Hauteur maximum avec pieds	1,05 m

six prototypes. Il donne également des évaluations des frais unitaires, dans l'hypothèse où la production se fait en série (1 dollar = 60 pesetas).

Tableau 2

Alambic	1	2	3	4	5	6
Production annuelle en litres . . . . .	1 821	1 345	1 492			
Coût des matériaux . . . . .	2 212	2 636	2 235	3 654	2 950	2 527
Coût de la main-d'œuvre. . . . .	2 866	2 950	2 600	3 274	2 610	2 450
Coût total (Prototype) en pesetas . . . . .	5 078	5 586	4 835	6 928	5 560	4 977
Coût évalué pour une unité de série.	2 980	3 320	2 860	—	—	—

Dans nos travaux, nous avons été guidés, notamment, par les publications intéressantes sur les alambics des chercheurs Wilson (Australie), Gomella (Algérie), Howe, Löf et Telkes (États-Unis), et Nebbia (Italie).

### Références

1. *Saline Water Conversion*, Rapport annuel du Secrétaire de l'intérieur, Département de l'intérieur des États-Unis, Washington.
2. Ellis, Cecil B., *Fresh Water from the Ocean*, The Ronald Press Company, New-York.
3. Azcárraga, L. de, *Aprovechamiento de las energías solar y eólica* (La mise en œuvre des énergies solaire et éolienne), Conférence mondiale de l'énergie, Session partielle de Madrid, 5 au 9 juin 1960.
4. Barasoain, J. A. et Fontán, L., *Primeras experiencias de destilación solar del agua en España* (Premières expériences sur la distillation solaire de l'eau en Espagne), *Revista de Ciencia Aplicada*, 72, janvier-février 1960.
5. Edlin, F. E., *Matériaux nouveaux pour l'utilisation de l'énergie solaire*, Colloque international sur les applications thermiques de l'énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie, Mont-Louis 1958.

### *Résumé*

La préparation d'eau douce à partir d'eau saumâtre présente un vif intérêt dans les pays très ensoleillés, particulièrement dans les régions côtières où l'eau douce et l'énergie manquent.

Le présent mémoire indique les données relatives à l'insolation et à l'énergie solaire qui ont été enregistrées en Espagne.

Pour faire face aux besoins ménagers des petits consommateurs, on procède actuellement à l'étude de divers modèles de distillateurs solaires construits avec des matériaux nationaux.

On a soumis dix modèles d'alambics ou distillateurs de ce genre aux essais et on étudie, dans le présent mémoire, le comportement de trois d'entre eux sur une période relativement longue, ce qui permet d'aboutir à quelques conclusions quant à leur production.

On décrit trois prototypes d'une conception nouvelle et actuellement en cours d'expérimentation.

On donne les chiffres annuels de production, ainsi que le coût des matériaux et de la main-d'œuvre pour plusieurs d'entre eux.

### SOME EXAMPLES OF SMALL-SCALE SOLAR DISTILLATION OF WATER

#### *Summary*

The conversion of brackish water to fresh water is of great interest in countries with abundant sunshine, especially in coastal areas where water and sources of energy are scarce.

This paper gives Spanish sunshine and solar energy records.

Several types of solar stills using Spanish materials, and designed to serve small household consumers, are under study.

Ten still types have been tested. The performance of three of these types over a relatively long period is discussed, and conclusions on their industrial production are drawn.

Three recent prototypes of new design, now under test, are described.

The annual production and costs of material and labour for several types are given.

## POSSIBILITÉS D'EXTENSION DES DIMENSIONS DES DISTILLATEURS SOLAIRES

*Cyril Gomella \**

Une analyse parallèle des procédés de dessalement et des procédés de captage et de transformation de l'énergie solaire fait apparaître que, dans l'état de choses actuel, le dessalement des eaux saumâtres ou de l'eau de mer par l'énergie solaire se ramène à celui du dessalement par un procédé utilisant l'énergie thermique, cette dernière étant elle-même obtenue par conversion de l'énergie solaire. Il apparaît également que la collecte de l'énergie solaire constitue la difficulté fondamentale.

Avec des collecteurs plats, horizontaux, simples et peu onéreux, mais déjà d'un prix non négligeable, on peut espérer mobiliser pratiquement des puissances de l'ordre de 800 Watts au m<sup>2</sup> en pointe journalière, avec un total quotidien de 4 kWh en hiver et 6 kWh en été, si on collecte l'énergie à de très basses températures (30 à 50 °C), et ceci encore dans les régions les plus favorisées du globe. Avec les mêmes collecteurs, les valeurs sont à diviser par deux si on collecte l'énergie à une température nettement supérieure (80 à 100 °C).

Le captage de quantités plus importantes à des températures supérieures conduit immédiatement à des surfaces de collectes complexes, d'un prix sensiblement plus élevé, et à des dispositifs concentrateurs eux-mêmes compliquant le dispositif et grevant le prix de revient.

Ceci explique pourquoi la transposition pure et simple des dispositifs de dessalement thermique classiques a jusqu'à présent échoué. On comprend également pourquoi la mise au point de dispositifs ingénieux nécessitant au départ des températures relativement élevées reste encore à faire. L'obstacle principal reste toujours le prix élevé, la complexité, le mauvais rendement des collecteurs-convertisseurs.

Le distillateur du type serre, bien connu maintenant, n'échappe pas à la fatalité qui pèse sur les appareils solaires. C'est cependant un appareil beaucoup moins simple qu'il n'en a l'air au premier abord et un appareil bien adapté à l'utilisation rationnelle de l'énergie solaire.

Son principal intérêt économique réside dans le fait qu'il constitue dans ses parties principales un collecteur convertisseur plat, et que ces mêmes parties servent simultanément à l'emploi de l'énergie thermique obtenue aux fins du dessalement par distillation simple effet.

La surface de collecte est constituée par le fond de la cuve-chaudière, la masse d'eau elle-même

participant à l'absorption du rayonnement, surtout si elle est colorée au préalable.

La couverture transparente protégeant le collecteur plat contre les déperditions par convection délimite simultanément le volume de stockage et de transfert de la vapeur d'eau, la surface transparente elle-même servant de surface de condensation. De ce fait, la déperdition calorifique par convection par l'air extérieur et par rayonnement vers l'ambiance représente l'évacuation des calories de condensation et rend ainsi utile ce qui, dans un collecteur plat, ne serait qu'une perte d'énergie.

En regardant de plus près les phénomènes à l'intérieur de la serre, on s'aperçoit que ce rôle de surface de condensation réduit considérablement les pertes provenant du rerayonnement de la surface de collecte (surface libre de l'eau évaporée). En effet, la formation d'une pellicule d'eau condensée à la partie intérieure du vitrage, et qui se trouve être à une température peu différente de celle de la surface d'eau libre soumise à l'évaporation, réduit à peu de chose le transfert d'énergie par radiation entre l'eau et la surface de condensation, transfert qui est fonction de la différence des températures de ces deux surfaces.

L'apport principal d'énergie à la surface de condensation se résume alors à celui de la chaleur latente de condensation, et l'évacuation vers l'extérieur qui se produit au travers de la surface vitrée participe utilement au processus de distillation.

C'est en raison de ceci que les distillateurs du type serre n'obéissent pas directement aux lois de rendement des collecteurs plats ordinaires non sélectifs. Les pertes par rerayonnement dans un distillateur ne s'accroissent pas aussi rapidement quand la température de régime augmente. Pour des températures de l'eau de l'ordre de 75° à 80 °C et plus, on a obtenu un rendement de conversion de l'énergie solaire incidente restant de l'ordre de 60 p. 100, et même légèrement plus. Le distillateur solaire du type serre se comporte en fait comme un collecteur convertisseur sélectif de bonne qualité.

On a réalisé depuis plusieurs années dans le monde des prototypes de petits distillateurs solaires de type serre donnant toute satisfaction. En Algérie en particulier, un appareil domestique produisant de 2 à 9 litres d'eau par jour suivant les saisons et le lieu d'emploi a été mis au point et se trouve maintenant en service en plusieurs centaines d'exemplaires. Il constitue une solution rustique pour la production de l'eau de boisson nécessaire à un individu à partir d'eaux de toutes salures.

\* Société d'études pour le traitement et l'utilisation des eaux, Alger.

Quand on a voulu passer à une production d'eau plus considérable, même à l'échelle d'une toute petite agglomération humaine, on a cherché à extrapoler les dimensions du distillateur du type serre afin d'en conserver les avantages cités plus haut. Cependant la similitude géométrique dans un appareillage ne conduit généralement pas à la conservation des paramètres caractéristiques des phénomènes en cause. C'est pourquoi, avant d'entreprendre la construction de distillateurs solaires du type serre de dimensions notables, on a jugé utile, en Algérie, de procéder à une expérimentation permettant de mieux définir les lois de production d'eau distillée par les distillateurs serre.

### Paramètres gouvernant la production des distillateurs type serre

#### Dispositif expérimental

Nous avons établi à Touggourt (33°7'N) six appareils identiques en tout, sauf en ce qui concerne la profondeur de la cuve. Ces appareils, d'une surface captante utile de 1,765 m<sup>2</sup>, étaient recouverts d'un toit vitré à double pente (inclinaison 10°). Leurs parois extérieures étaient très soigneusement isolées thermiquement au moyen d'une double couche de laine de verre et de mousse de polyuréthane.

La surface supérieure de la lame d'eau était dans tous les appareils à la même distance de la surface vitrée de condensation. La distance moyenne était de 7 cm. Les différentes épaisseurs de lame d'eau choisies, étaient de 2 cm, 5 cm, 15 cm, 40 cm, et 100 cm.

Les appareils étaient munis de sondes thermométriques disposées à différents endroits des lames d'eau. On mesurait le volume produit quotidien, et une fois par semaine le débit horaire pendant les heures d'insolation.

Périodiquement, on mesurait également les températures de la surface extérieure des vitres de condensation, à l'aide d'un pyromètre à contact.

La masse d'eau était colorée par un mélange de quebracho, noir animal et vert naphthol, de façon que l'absorption du rayonnement solaire se fasse uniformément pour tous les appareils, dans la couche d'eau supérieure.

#### Épaisseur de lame et production quotidienne

Dans le tableau ci-après figurent les résultats moyens obtenus au cours d'une période d'expérimentation d'un an, après trois mois environ de mise en régime des appareils (période de mise en régime nécessaire aux appareils les plus profonds).

Production quotidienne moyenne, en litres/jour

Appareils	2 cm	5 cm	15 cm	40 cm	100 cm
Mois VII . . . . .	10,2	10,1	8,7	8,2	7,4
VIII . . . . .	10,4	9,2	8,5	7,8	6,0
IX . . . . .	8,0	7,3	6,4	5,9	5,6
X . . . . .	5,0	4,5	3,9	3,7	3,6
XI . . . . .	2,7	2,4	2,0	1,9	1,8
XII . . . . .	2,0	1,8	1,5	1,2	1,4
I . . . . .	2,4	2,0	1,8	1,6	1,5
II . . . . .	3,1	2,8	2,3	2,0	1,7
III . . . . .	5,3	4,2	3,2	3,5	2,9
IV . . . . .	8,0	7,5	6,0	5,4	5,4
V . . . . .	9,1	8,2	7,4	6,5	5,9
VI . . . . .	9,8	10,0	8,5	7,8	7,0

Les productions quotidiennes moyennes annuelles, pour chacun des appareils, sont les suivantes :

Profondeur (cm)	Production (l/jour)	Rapport/2 cm
2	6,33	100 %
5	5,83	92 %
15	5,02	80 %
40	4,62	73 %
100	4,18	66 %

La relation liant la production quotidienne moyenne annuelle à la profondeur en cm de la lame d'eau, est la suivante :

$$Y \text{ l/j} = \frac{22,754}{x \text{ cm} + 7,872} + 4,025.$$

La forme hyperbolique de l'équation est vérifiée pour les productions quotidiennes moyennes mensuelles. On peut donc dire que la relation liant la production d'un distillateur solaire du type serre à la profondeur de la lame d'eau est de la forme :

$$Y = \frac{a}{x + b} + c.$$

Les constantes  $a$ ,  $b$  et  $c$  dépendent de la forme de l'appareil et des conditions locales (latitude, intensité du rayonnement, époque de l'année, etc.)

On en déduit que la production d'un distillateur du type serre sera très sensiblement influencée par la hauteur de lame, dans les appareils à faible épaisseur de lame. Par contre, l'influence relative d'une variation d'épaisseur sera d'autant moins sensible, que la profondeur de lame sera grande.



Débit instantané en litres/heures/m<sup>2</sup>

Appareils	2 cm	5 cm	15 cm	40 cm	100 cm
(nombre d'heures)					
0	0,00	0,03	0,10	0,13	0,13
1	0,00	0,03	0,10	0,13	0,13
2	0,00	0,03	0,10	0,13	0,13
3	0,00	0,03	0,10	0,13	0,13
4	0,00	0,03	0,10	0,13	0,13
5	0,00	0,03	0,10	0,13	0,13
6	0,00	0,03	0,10	0,13	0,13
7	0,00	0,04	0,10	0,13	0,13
8	0,03	0,05	0,10	0,13	0,13
9	0,10	0,08	0,13	0,13	0,08
10	0,25	0,16	0,20	0,16	0,09
11	0,44	0,26	0,26	0,20	0,12
12	0,62	0,38	0,34	0,25	0,17
13	0,73	0,48	0,38	0,28	0,22
14	0,80	0,57	0,40	0,30	0,24
15	0,78	0,63	0,40	0,31	0,25
16	0,60	0,60	0,33	0,28	0,24
17	0,40	0,50	0,27	0,25	0,20
18	0,28	0,40	0,23	0,21	0,18
19	0,17	0,31	0,19	0,17	0,16
20	0,12	0,23	0,18	0,16	0,14
21	0,07	0,16	0,16	0,14	0,13
22	0,04	0,12	0,16	0,14	0,13
23	0,01	0,07	0,12	0,13	0,13

Cela est fort affligeant, car il aurait été commode de pouvoir disposer d'une latitude de quelques centimètres dans la réalisation des appareils de grande surface à lame d'eau mince.

On en déduit également qu'à partir du moment où on ne peut trouver une solution satisfaisante pour maintenir la lame d'eau aux environs de 2 cm, on peut franchement faire faire un saut considérable à l'épaisseur de la lame d'eau. L'appareil aura certes une production sensiblement inférieure, mais la fixation de la cote d'eau au cm près ne présente plus grande importance. On peut alors, en particulier, admettre une variation sensible de l'épaisseur de la lame d'eau dans le même appareil (c'est-à-dire utiliser un radier incliné, favorisant l'écoulement de l'eau et le nettoyage).

On en déduit aussi qu'à partir d'une épaisseur de l'ordre de 100 cm la production deviendra sensiblement constante.

#### Épaisseur de lame et productions instantanées

L'augmentation de l'épaisseur de la lame d'eau accroît l'inertie thermique, ce qui a pour effet d'atténuer l'amplitude des variations de débit instantané en cours de journée.

Alors que pour un appareil à lame mince la variation de débit instantané suit de très près la variation de l'apport d'énergie solaire, un appareil à lame épaisse absorbe de l'énergie au moment du maximum d'insolation pour restituer lentement cette énergie pendant les périodes d'insolation plus faible, et même pendant la nuit, ou une partie de celle-ci.

Par exemple, le débit instantané au cours d'une journée donne (en été) les chiffres ci-dessus.

L'amplitude de la variation du débit instantané en cours de journée est de l'ordre de :

Appareils	Amplitude en litre/h/m <sup>2</sup>
2 cm . . . . .	0,80
5 cm . . . . .	0,60
15 cm . . . . .	0,39
40 cm . . . . .	0,18
100 cm . . . . .	0,12

Le débit maximum représente en pourcentage du débit minimum :

Appareils	Débit maximum	Débit minimum	Pourcentage
2 cm . . . . .	0,80	0,00	infini
5 cm . . . . .	0,63	0,03	2 100
15 cm . . . . .	0,40	0,10	400
40 cm . . . . .	0,30	0,13	230
100 cm . . . . .	0,25	0,13	192

L'augmentation d'épaisseur répartit la production sur l'ensemble de la journée, mais le résultat global, comme on l'a vu précédemment, est moins bon.

#### Épaisseur de lame et températures

Le dépouillement des très nombreuses mesures accumulées pendant l'expérimentation conduit aux conclusions ci-après :

a) Pendant les heures d'ensoleillement, la température des couches supérieures, dans le distillateur à lame de profondeur 100 cm, est plus élevée et

s'accroît plus rapidement que la température des couches sous-jacentes;

b) Chaque jour, chaque couche passe à un maximum et un minimum de température, d'autant plus accusés que la couche est plus proche de la surface;

c) Le maximum de température est atteint d'autant plus tôt dans la journée que la couche est plus proche de la surface;

d) La situation est la même pour les minimums, les couches supérieures se refroidissent plus rapidement que les couches profondes;

e) Dans les couches supérieures, il y a inversion du gradient de température après le coucher du soleil, les couches les plus proches de la surface sont plus froides que les couches immédiatement sous-jacentes;

f) Cette inversion du gradient de température se fait quotidiennement dans la première couche de 5 cm, assez fréquemment dans la couche des 20 premiers centimètres, très exceptionnellement dans la couche des premiers 40 cm, et jamais en dessous.

Il en résulte qu'il y a formation de strates de couches d'eau isothermes au cours de la période d'ensoleillement; en d'autres termes, l'énergie rayonnante absorbée par l'eau colorée dans les couches supérieures fournit des calories dont une partie se propage verticalement vers le bas.

L'examen des courbes traduisant cette propagation montre une similitude frappante avec les courbes de propagation à travers un milieu isotrope d'une perturbation thermique superficielle. On peut donc affirmer qu'au cours de l'ensoleillement du distillateur, il se produit une fuite thermique par conduction vers les couches inférieures.

Au cours de la période de refroidissement, les couches situées tout près de la surface évaporatoire fournissent l'énergie nécessaire à l'évaporation et deviennent plus froides que les couches situées dans les 20 premiers centimètres.

Ces dernières fournissent en retour les calories à la couche évaporatoire supérieure au moment de l'inversion du gradient de température. Mais cette récupération des calories emmagasinées n'intéresse généralement que ces 20 premiers centimètres, et très exceptionnellement les 40 premiers centimètres. Elle ne touche jamais les couches plus profondes.

On peut donc considérer que les calories emmagasinées dans les couches situées à une cote inférieure à 30 ou 40 cm, sont définitivement perdues. Leur réutilisation demanderait un brassage mécanique du liquide dans toute sa masse.

Si on compare maintenant entre eux les appareils de différentes profondeurs, on constate, comme cela est prévisible, que la température maximum de la surface évaporatoire est d'autant plus faible que la lame d'eau est plus épaisse.

Voici quelques valeurs relevées en cours d'expérimentation et qui permettent de juger de l'importance des différences enregistrées suivant les saisons :

Appareils	Température maximum de l'eau en surface (degrés centésimaux)		
	Été	Automne et printemps	Hiver
2 cm . . . . .	85°	67°	53°
5 cm . . . . .	76	57	39
15 cm . . . . .	62	48	23
40 cm . . . . .	56	43	21
100 cm . . . . .	53	40	20,5

L'amplitude des variations de températures en cours de journée est d'autant plus élevée que les variations de température de l'ambiance extérieure sont plus fortes et que l'épaisseur de la lame d'eau est plus faible.

Pratiquement, les appareils de 2 et 5 cm voient la température de l'eau tomber au cours de la nuit au voisinage de la température de l'ambiance extérieure, c'est-à-dire 25 à 30° en été, 8° à 3° l'hiver.

Saisons	Appareils	Températures		
		Ambiance	Eau	Vitre
Été. . . . .	2 cm	37°	83°	58°
	5 cm		72°	53°
	15 cm		62°	47°
	40 cm		51°	45°
	100 cm		50°	46°
Automne et printemps. . . . .	2 cm	25°	63°	35°
	5 cm		52°	32°
	15 cm		39°	28°
	40 cm		36°	28°
Hiver. . . . .	100 cm	17°	36°	28°
	2 cm		52°	26°
	5 cm		38°	22°
	15 cm		23°	20°
	40 cm		22°	20°
	100 cm		22°	19°

Les autres appareils conservent toute la nuit une température légèrement supérieure à celle de l'ambiance. En hiver en particulier, les appareils de 40 et 100 cm de profondeur conservent en surface une température voisine de 10 à 12° et, à cette époque, leur minimum est moins bas que celui des appareils à lame plus mince.

Il est intéressant de donner une vue sur les différences de températures existant entre l'ambiance, la surface vitrée de condensation et l'eau à la surface évaporatoire. Voir quelques chiffres assez significatifs en page précédente.

Il apparaît très nettement que lorsque la température de l'eau tombe au voisinage de 50 à 40°, la température de la vitre de condensation devient très voisine de la température d'ambiance. Le rapport surface de condensation/surface d'évaporation est alors manifestement trop élevé. Le même pouvoir d'évacuation de calories pourrait être obtenu à partir d'une surface de condensation plus faible.

Quand la température de l'eau atteint 60°, la différence de température entre la surface de condensation et l'ambiance atteint 10° et croît ensuite très rapidement lorsque la température de l'eau continue à augmenter. La surface de condensation travaille alors fortement, et il faut être prudent si on désire diminuer le rapport surface de condensation/surface d'évaporation.

#### Température de l'eau et débit

Nous avons cherché à déterminer s'il existait une relation entre le débit instantané et la température de l'eau dans la surface évaporatoire. Il est évident que ce débit instantané est également fonction d'autres paramètres, ne serait-ce que les conditions extérieures. Nous considérons cependant que les distillateurs solaires doivent être employés fréquemment dans les régions arides de latitude assez basse, où les conditions sont voisines de celles qui règnent au Sahara.

Nous avons dépouillé des observations faites en différents points du Sahara et à Alger même.

Nous avons déterminé ainsi, que la courbe de production d'un distillateur plat du type serre était fonction de la température de l'eau suivant une loi hyperbolique.

Les deux courbes enveloppes des valeurs trouvées sont les suivantes :

$$Y = \frac{51,607}{117 - x^\circ} - 0,613$$

et

$$Y = \frac{51,607}{112 - x^\circ} - 0,613$$

où  $Y$  est le débit instantané exprimé en litres par heure et par m<sup>2</sup> de distillateur solaire (surface utile), et

$x^\circ$  est la température en degrés centésimaux de l'eau dans la couche supérieure.

Les valeurs numériques sont propres au cas particulier. On peut cependant estimer que la relation hyperbolique exprime une loi générale de débit pour les distillateurs du type serre.

Ces équations expriment bien la chute très rapide du débit lorsque la température s'abaisse. Au-dessous de 40 à 30 °C, la production devient quasiment négligeable.

C'est la raison pour laquelle la récupération de calories qui se fait au cours de la nuit dans les appareils à grande profondeur de lame d'eau, récupération qui s'effectue à un niveau de température voisin de 30 à 40 °C, ne peut compenser le manque de débit de ces appareils au cours des heures d'ensoleillement.

#### Distance eau-surface de condensation et débit

Les vitesses instantanées d'évaporation et de condensation sont commandées par un coefficient de transfert de masse qui a la forme :

$$h_D = \frac{D \cdot P}{y \cdot P_m}$$

où  $D$  est un coefficient appelé diffusivité,  
 $P$  la pression totale de l'air humide,  
 $P_m$  la pression moyenne logarithmique de l'air dans l'épaisseur d'air humide où se produit la diffusion, et  
 $y$  l'épaisseur d'air humide intéressée par la diffusion.

Le rapprochement de la surface de condensation au plus près de la surface évaporatoire doit par conséquent augmenter la production. Le transfert des molécules d'eau en est facilité. La diminution de l'espace intermédiaire agit sur la violence des courants de convection qui, pour une même énergie motrice, intéressent un volume d'air humide bien moindre. Le brassage de l'air au voisinage des surfaces d'évaporation et de condensation diminue l'épaisseur de la couche d'air humide  $y$  dans laquelle le transfert de vapeur ne se fait que par diffusion.

De plus, au sein des courants de convection eux-mêmes, la diffusion continue à faire son effet et s'ajoute aux transferts de vapeur dus aux mouvements des filets d'air humide. Cette diffusion doit s'effectuer à travers tout l'espace séparant l'eau de la vitre, et la diminution de la distance eau-vitre donne une importance plus grande à ce transfert complémentaire.

Une vérification expérimentale a été faite en augmentant de 2 cm la distance moyenne séparant le plan d'eau de la surface de condensation, tout en restant égal par ailleurs. Le résultat obtenu a été conforme aux prévisions : l'appareil avec la plus grande distance eau-vitre a fourni moins d'eau que l'appareil témoin.

Pour une augmentation moyenne de la distance de 20 p. 100, la chute de production quotidienne moyenne annuelle a été de l'ordre de 6 p. 100. Le

déficit le plus important a été constaté pendant les mois d'hiver et atteint 12 p. 100 environ.

### Augmentation des dimensions des distillateurs du type « serre »

Une installation de grande dimension peut être conçue comme :

1) Un pavage de la superficie à l'aide d'une mosaïque de petits appareils;

2) Une juxtaposition de couloirs parallèles de grande longueur mais de largeur raisonnable, permettant la pose aisée des surfaces de condensation et un accès commode, à portée humaine, en tous points de l'installation;

3) Un immense bassin d'un seul tenant, cloisonné ou non, mais dont la surface de condensation devra obligatoirement être réalisée sous forme d'une juxtaposition de toits allongés parallèles, un seul toit d'un seul tenant n'étant pas concevable pour la couverture d'un bassin de très grande dimension en raison de la pente qu'il faut obligatoirement donner à ce toit pour permettre le recueil des eaux condensées.

Le rendement unitaire d'une mosaïque de petits appareils sera sensiblement identique à celui de chaque appareil pris séparément. Par contre, le rendement unitaire des deux autres types de réalisation sera *a priori* moins bon.

Les grands appareils fonctionneront en effet obligatoirement à un régime de température plus bas, du fait que :

a) L'épaisseur de la lame d'eau ne pourra être maintenue à sa valeur exacte, sur une grande surface, avec la même précision que dans les petits appareils; pour éviter la mise au sec d'une partie du radier, on sera obligatoirement tenu à utiliser une épaisseur de lame plus grande;

b) Dans la généralité des cas, le constructeur sera poussé à choisir une épaisseur de lame d'eau assez grande, et ceci pour des commodités d'approvisionnement en eau en tous points de la grande surface, pour faciliter le nettoyage et pour lutter par dilution contre les dépôts salins;

c) L'isolement thermique du radier sera toujours difficile à réaliser d'une façon convenable dans un grand appareil bâti.

La distance entre la surface évaporatoire et la surface de condensation sera obligatoirement plus grande que dans les petits appareils, et ceci dans la proportion des dimensions prises suivant la ligne de plus grande pente des surfaces de condensation inclinées.

Pour présenter un intérêt économique pratique, l'augmentation des dimensions d'un distillateur du type serre devra avoir pour corollaire un abaissement considérable du prix unitaire de construction et éventuellement des frais d'entretien et d'exploitation.

Il reste bien entendu par ailleurs que la comparaison des prix de revient unitaires devra être faite entre celui d'un appareil de petite dimension construit en grande série (en y incluant le prix des canalisations et des dispositifs d'alimentation, de collecte et de vidange) et celui d'un appareil bâti de grande surface.

Une étude économique comparative a été faite en Algérie pour déterminer le prix de construction unitaire au Sahara en une région d'accessibilité aisée (chemin de fer, route, aérodrome) d'une surface distillante du type serre de 10 000 m<sup>2</sup>.

L'étude a porté sur la réalisation de cette surface sous les formes ci-après :

a) Pavage à l'aide de petits appareils serre préfabriqués en amiante ciment de 1,25 m<sup>2</sup>;

b) Couloirs juxtaposés en forme de table de béton surélevée de 2,7 m de large, isolée thermiquement, toit en double pente 10°, couverture vitrée;

c) Identique au précédent, non isolé thermiquement;

d) Analogue à b, mais 2,5 m de large, toit simple pente;

e) Identique au précédent non isolé thermiquement;

f) Couloirs juxtaposés de béton, bâtis à même le sol, avec radiers à béton cellulaire, 2,50 m de large, toit simple pente;

g) Identique au précédent, 1,50 m de large;

h) Couloirs terrassés, entre murettes, fond bitumineux, 2,50 m de large, toit simple pente.

Le tableau ci-après donne les prix de revient et les rendements comparés de ces appareils, ceux du petit appareil étant pris comme référence :

Type d'appareil	Prix m <sup>2</sup> estimé	Production estimée	Prix production
a. . . . .	1	1	1
b. . . . .	1,1	0,8	1,35
c. . . . .	1	0,7	1,4
d. . . . .	0,8	0,75	1,06
e. . . . .	0,7	0,7	1
f. . . . .	0,6	0,5	1,2
g. . . . .	0,65	0,55	1,18
h. . . . .	0,35	0,5	0,7

### Résumé

L'expérimentation systématique qui a été conduite en Algérie et au Sahara a permis de déterminer les valeurs numériques et les relations concernant certains des paramètres qui gouvernent le fonctionnement des distillateurs du type serre.

Les résultats obtenus ont permis :

a) De fixer les critères de qualité qui doivent être recherchés pour les distillateurs :

Régime de température élevée;

Épaisseur de lame d'eau faible;

Distance eau-surface de condensation la plus faible.

b) De prévoir les baisses de production qui résulteront de l'augmentation des dimensions des appareils.

c) De déterminer que l'utilisation de l'inertie thermique qui répartirait une production instantanée plus faible sur une durée plus grande doit conduire à des résultats moins rentables que le fonctionnement avec une inertie thermique minimum.

d) De vérifier expérimentalement ou numériquement certaines indications globales d'autres chercheurs (toit en faible pente, épaisseur de lame, distance eau-vitre, etc.).

e) De expliquer pourquoi les distillateurs inclinés à tissu (mèche) humide, parallèle à la vitre, ont un rendement supérieur à celui des distillateurs du type serre classique.

Ces appareils inclinés réunissent l'avantage d'une inertie thermique minimum, d'une épaisseur de lame d'eau quasi nulle et d'une distance très faible entre la surface évaporatoire et la surface de condensation.

L'étude de différents projets de réalisation de distillateurs de grande dimension a montré que l'abaissement du prix de construction était généralement accompagné d'un abaissement parallèle de la production unitaire.

Le paramètre caractéristique dont il faut obtenir l'abaissement est le suivant :

$$\frac{\text{prix unitaire}}{\text{production unitaire}}$$

Le simple fait de réaliser des appareils avec des moyens industriels ne permet pas d'abaisser ce paramètre.

Il semble bien que la transposition pure et simple des distillateurs de type serre à une échelle plus grande, avec des matériaux conventionnels, doit toujours conduire à des résultats soit décevants soit d'un intérêt médiocre. Il faudrait imaginer un mode de réalisation à l'aide de matériaux très bon marché et ne demandant que très peu de main-d'œuvre spécialisée pour leur mise en œuvre.

Le but à atteindre serait l'abaissement du prix de construction unitaire au centième, voire au

deux-centième, de celui des petits appareils actuels, à condition toutefois que la production unitaire ne tombe point au-dessous de 50 p. 100 de ce que donnent ces petits appareils.

L'abaissement très sensible du prix des matières plastiques et la très grande amélioration de qualité qui ont été enregistrées ces cinq dernières années permettent de penser que le but proposé n'est pas inaccessible.

Cependant, à la date d'aujourd'hui, l'ensemble des caractéristiques (longévité, résistance mécanique, prix, facilité de mise en œuvre) n'a pas encore atteint un niveau suffisant pour que l'on puisse espérer un succès significatif dans un proche avenir.

La production de quantités importantes d'eau par énergie solaire mérite donc d'être recherchée dans d'autres voies que celles dérivant du distillateur du type serre classique. Un des procédés possibles consiste à augmenter très sensiblement le niveau de température de collecte de l'énergie captée, pour l'utiliser ensuite dans des conditions favorables au sein d'un appareil à effets multiples.

Cette voie satisfait théoriquement l'esprit. Cependant les réalisations pratiques à la date d'aujourd'hui n'ont pas permis d'abaisser le paramètre

$$\frac{\text{prix unitaire}}{\text{production unitaire}}$$

Mais cette voie n'est certainement pas stérile, et mérite d'être exploitée à fond.

L'autre procédé consiste à réaliser le captage par des moyens peu onéreux de quantités très importantes d'énergie solaire (lagune ou courant d'air chaud) à un niveau assez bas de température, et de transporter ensuite ces calories tièdes vers un dispositif adéquat de distillation à basse température.

Cette voie a déjà été explorée par Georges Claude et par les chercheurs qui s'appliquent à mettre au point des appareils dits « à faible différence de température ».

Cette voie présente un intérêt tout particulier : les quantités d'énergie solaire captées à faible prix de revient peuvent être énormes. On peut toujours concevoir une échelle de réalisation telle qu'un appareillage d'extraction complexe et onéreux devienne rentable et permette de faire tomber très bas la valeur du rapport :

$$\frac{\text{prix unitaire}}{\text{production unitaire}}$$

La difficulté principale proviendra généralement de l'énormité de l'installation correspondant à un prix unitaire acceptable.

## POSSIBILITIES OF INCREASING THE DIMENSIONS OF SOLAR STILLS

### Summary

The systematic experimentation in Algeria and the Sahara has disclosed the numerical values and relations concerning some of the parameters that govern the operation of hothouse-type solar stills.

The results have made it possible:

(a) To lay down the criteria of quality that stills should meet:

- High-temperature operation;
- Minimum thickness of the film of water;
- Shortest distance between water and condensation surface.

(b) To predict the decrease in unit output that will result from increasing the still size.

(c) To determine that the utilization of thermal inertia, which would distribute a smaller instantaneous output over a longer period, will probably lead to less economic results than operation at minimum thermal inertia.

(d) To verify, experimentally or numerically, certain overall indications given by other investigators (gently sloping roof, thickness of the water film, water-pane distance, etc.).

(e) To explain why inclined stills with a wet cloth (wick) parallel to the pane have an efficiency higher than that of the conventional hothouse type stills.

These inclined stills combine the advantages of minimum thermal inertia, almost zero water-film thickness, and a very short distance between the evaporating and condensing surfaces.

The study of various plans for realizing large stills has shown that the decrease in their construction cost is usually paralleled by a decrease in unit output.

The characteristic parameter that must be decreased is:

$$\frac{\text{unit cost}}{\text{unit output}}$$

The simple fact that stills may be built by industrial procedures will not, in itself, permit a decrease in this parameter.

It really does seem that the pure and simple shift of hothouse-type stills to a larger scale, but still using the conventional materials, must always lead to results that are either deceptive or uninteresting. We must devise an embodiment using very inexpensive materials and requiring only very little skilled labour to start them up.

The objective should be to lower the unit construction cost to a hundredth—or even a two-hundredth—that of the small stills of today, provided that the unit output does not fall below 50 per cent of what the small stills give.

But today the combination of characteristics (durability; ruggedness; cost; facility of installation) has not yet reached a level sufficient to justify the hope of significant successes in the near future.

The production of large quantities of water by solar energy should thus be sought on other roads than those involving the conventional hothouse-type still. One of the possible methods would be a very appreciable increase in the collection temperature of the energy, for subsequent use under favourable conditions in a multiple-effect system.

This way theoretically satisfies the mind. But its practical embodiments, as of today, have not permitted a decrease in the parameter

$$\frac{\text{unit cost}}{\text{unit output}}$$

But this way is certainly not sterile, and it deserves to be explored fundamentally.

The other method consists in capturing every large amount of solar energy by inexpensive means (a lagoon or current of hot air) at a fairly low temperature level, and then to transfer these warm calories to an adequate low-temperature distillation set-up.

This way has already been explored by Georges Claude, and by investigators who seek to develop devices operated at what are called "small differences of temperature".

This way is of most particular interest; the quantities of solar energy captured at low cost might be immense. It is always possible to conceive a scale of realization that would make even a complex and costly extraction plant economic, and would depress the value of the ratio

$$\frac{\text{unit cost}}{\text{unit output}}$$

to very low levels indeed.

The primary difficulty would generally reside in the immense size of the plant corresponding to any acceptable unit cost.

## FORCED-CONVECTION, MULTIPLE-EFFECT SOLAR STILL FOR DESALTING SEA AND BRACKISH WATERS

Werner N. Grune,\* Richard A. Collins and T. Lewis Thompson\*\*

All life ultimately depends upon the supply of fresh water. The earth and its atmosphere hold an inconceivably immense store of water in an equilibrium that cannot be changed. Practically all of the world's water wealth is in the oceans, but this water is polluted with the salt accumulation of millions of years. Nature must be credited with providing ample water, but timing and delivery are imperfect. Furthermore, in any one region, the total precipitation varies widely from season to season and from year to year. Water supply and demand are not evenly distributed.

Generally, the shortage of fresh water is more critical where an abundance of the sun's energy is available. At the present state-of-the-art, the cost of successful conversion of sea water to fresh water by the use of solar energy is excessive. Solar energy is available only in the form of low temperature heat which is difficult to convert economically into work, difficult to store and to transport. The efficiency of solar energy conversion achieved by photosynthetic processes is about 20 per cent (1). In contrast, efficiencies as high as 62 per cent (2) and higher for solar collection may be achieved, making demineralization of saline water by solar energy conversion potentially attractive.

Because of the difference in wave-lengths between solar radiation and thermal radiation from a heated body, it is possible to construct an energy trap which allows the short-wave solar radiation to enter but is opaque to the long-wave thermal radiation emanating from the collector plate. The collected energy can be utilized to distil sea or brackish water.

Evaluation of the performance of several theoretical and experimental solar demineralization systems has shown that numerous economic, construction and operating problems exist. These problems include initial high capital investment, low efficiency, maintenance difficulties, unsteady operation, leakage, large heat loss and impracticability for large-scale installations.

The greatest amount of experimentation has been with horizontal basin distillers. About thirty methods for demineralizing saline water with solar energy were analysed by Löf (3) from the engineering and

economic standpoints and probable minimum costs. One of the thirty distillation processes described was a single-effect evaporator, modified to circulate vapor-laden air to an external, water-cooled condenser. Löf predicted that "An efficiency gain might be realized in some of the previously described units if lower condensing temperatures (and resulting lower evaporating temperatures) were achieved by employing external condensers. Some heat recovery by exchange with entering sea water could also be realised."

### New concepts in solar distillation

By applying the forced-convection principle and increasing the rate of mass transfer from the brine to the air stream, a more advanced design is shown in figure 1. As seen in this illustration, a dispersion tray over which the basin water is circulated increases the interfacial area for mass transfer into the air stream, while the area for thermal radiation between brine and cover is unchanged. This relationship between the areas increases the internal efficiency for the still and yields correspondingly higher specific productivities.

The maximum production obtained from such a design was 0.186 gal/sq ft./day with a solar radiation of 1 957 Btu/sq ft./day. Of the total production, 21 per cent was collected from the troughs and 79 per cent from the heat exchanger. The air flow through the still was 5.7 cfm in the optimum range of 5 to 7 cfm. Table 1 shows sample production rates for six high efficiency days during the 1960 experimental period.

It has been found that daily production rates may range from below to nearly twice those of natural convection stills, depending on the air-flow rate. In general, the following behavior may be expected for this still design. At excessive air-flow rates, little or no condensate appears on the cover, resulting in low gutter production, and exchanger production will be poor. Near, or at the optimum flow rate, the trough production will be approximately half the total production from a shallow-basin, natural-convection, still and the exchanger will produce at its maximum rate around the middle or late afternoon, usually dropping to a minimum of about half this value during the night and early morning. At flow rates below the optimum, gutter production will increase, approaching that from a deep-basin,

\* Professor of Sanitary Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia.

\*\* Graduate Research Assistants, Georgia Institute of Technology.

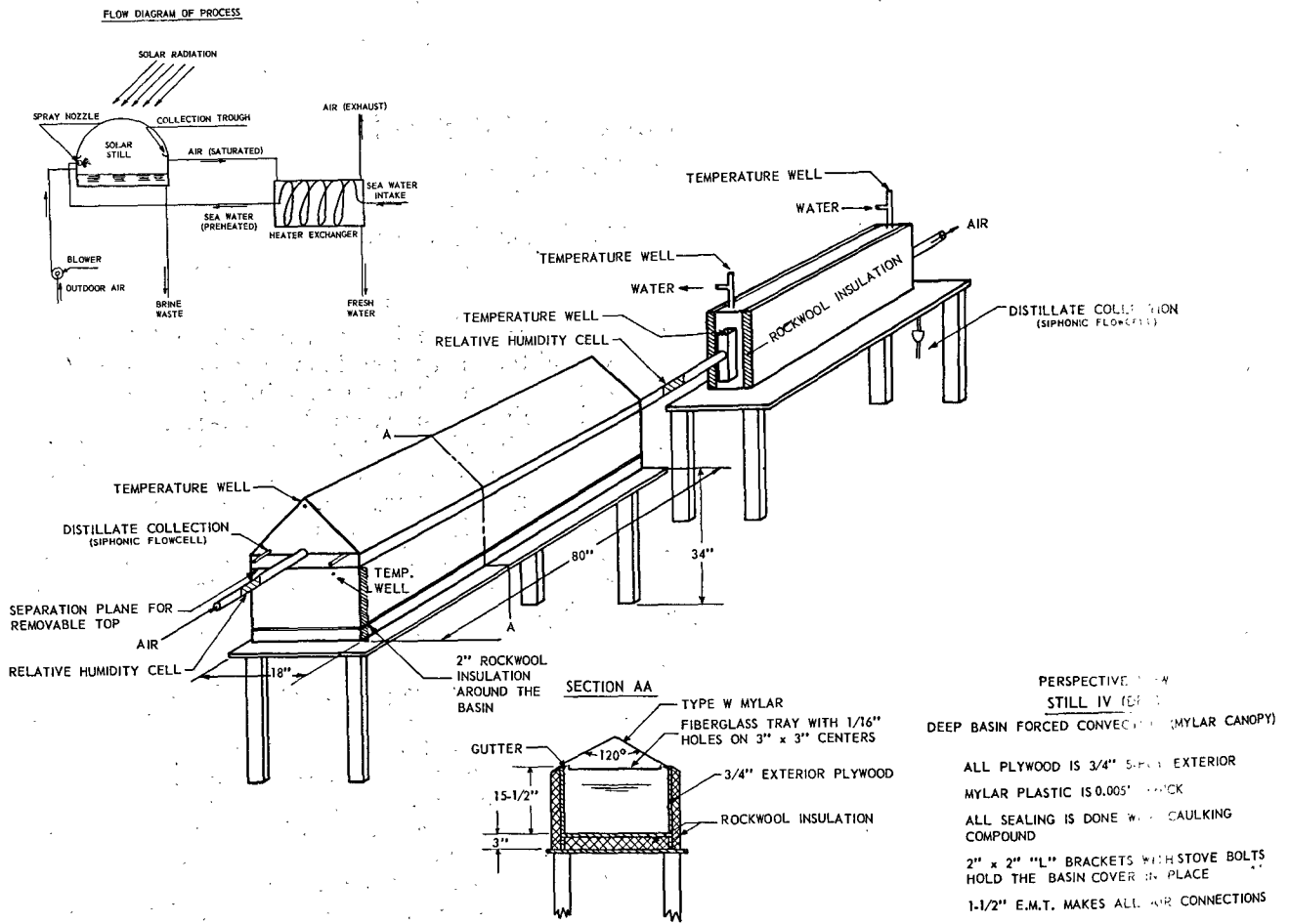


Figure 1. Perspective drawing of still IV (DFM)

natural-convection still and exchanger production will decrease, though not directly, with the air flow rate. A photograph of the improved design (Still IV) is shown in figure 2 and a view including all experimental stills in figure 3.

Some extremely high efficiencies were encountered due to extraction of moisture from the ambient air by the condenser. This contribution depends on the air-flow rate and the humidity (lb of water/lb of dry air) of the ambient air relative to that of the air leaving the condenser. This energy gain may amount to as much as one-third of the total received solar radiation.

If the enthalpy of the air leaving the condenser exceeds that of the ambient air, recycling of the heat exchanger effluent air contributes to the overall efficiency.

### Heat recovery

As solar energy is in the form of low temperature heat as well as only intermittently available, the investment must be minimized so that fixed costs are not excessive. The use of focusing or tracking collectors (4-9) has not effectively reduced the unit cost of fresh-water production. Instead, a solution

Table 1. Sample production rates

Date	Daily production		Solar radiation (btu/sq ft)
	(lb/sq ft)	(gal/sq ft)	
August 4 . . . . .	1.51	0.181	2 237
August 16. . . . .	1.48	0.178	1 817
August 30. . . . .	1.55	0.186	1 957
September 5. . . . .	1.48	0.178	1 905
September 6. . . . .	1.54	0.185	1 746
September 9. . . . .	1.51	0.181	1 769



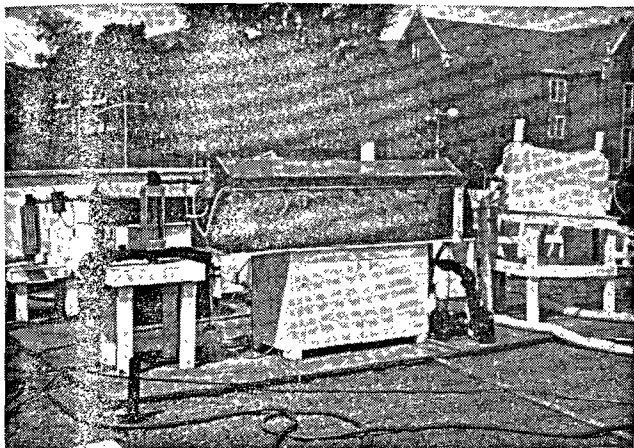


Figure 2. Close up of still IV (DFM)

to increase the productivity from solar distillers might be obtained by more efficient and relatively economical heat-recovery systems from so-called flat plate collectors.

#### NIGHT EVAPORATION OF CONDENSER COOLANT STORED IN THE DAYTIME

The enthalpy given up by the saturated air-vapor mixture during distillate production was transferred to the cooling water in the exchanger. This water was stored during the warmest part of the day and used to provide energy for additional distillate production during the night. A diagram of the storage system and associated relay circuit for automatically timed recirculation is shown in figure 4.

Figure 5 shows the results from the reuse of energy stored in the condenser coolant during a 24-hour period. Condenser coolant was stored from 1 to 5 p.m. while its temperature dropped from 106°F to 82°F. The flow rate of condenser coolant was 1.6 lb/min, sending 47 gallons to storage during the four-hour period. During the day, the production rate reached a peak of 0.1 lb/sq ft/hr and gradually dropped to a value near 0.002 lb/sq ft/hr shortly before midnight. The production rate was increased to 0.005 lb/sq ft/hr at about 2 a.m. by recirculation of the stored condenser coolant. The basin temperature increased 9°F (from 75°F to 84°F) between midnight and 1 a.m., and fell gradually to 76°F at 5 a.m. Without use of the stored coolant, production would have ceased near midnight as may be observed from the decreasing temperature difference between the air leaving the still and the air leaving the heat exchanger.

It may be observed that maximum night time-production occurred when the temperature of the air leaving the heat exchanger was 70°F which corresponds closely to a similar set of conditions at 9 p.m., prior to the recirculation of stored coolant. Obviously, if recirculation had been started earlier in the evening, a greater increase in production would have been observed.

While the observed effect on production was small, greater increase in production due to recycling stored coolant would have been obtained if the following had been carried out:

- (a) Recirculation of coolant earlier in the evening;
- (b) Storage of coolant during the period of maximum temperatures;
- (c) Operation at the optimum air-flow rate through the still;
- (d) Larger heat-exchanger area;
- (e) Improved insulation of the storage basin.

Due to inclement weather and the wetting of storage basin insulation, further experimentation was not possible.

#### Multiple-effect distillation

Either associated with some of the existing solar still designs or in entirely new arrangements, the use of multiple-effect evaporation in conjunction with solar energy has been proposed, for example the methods by Ginnings (10), Oxford (9) and Landry et al. (6). Lof (3) also investigated the merits of combining a reasonably conventional flatplate solar collector with a standard multiple-effect evaporating unit, but no experimental results along these lines have been reported.

Ginnings (10) designed a single unit for solar energy collection and water evaporation, having a self-contained condenser which employs multiple effect by means of porous wicks and plastic films. Saline water is fed into the proper layers of a series of porous films and wicks in sheet form and solar energy

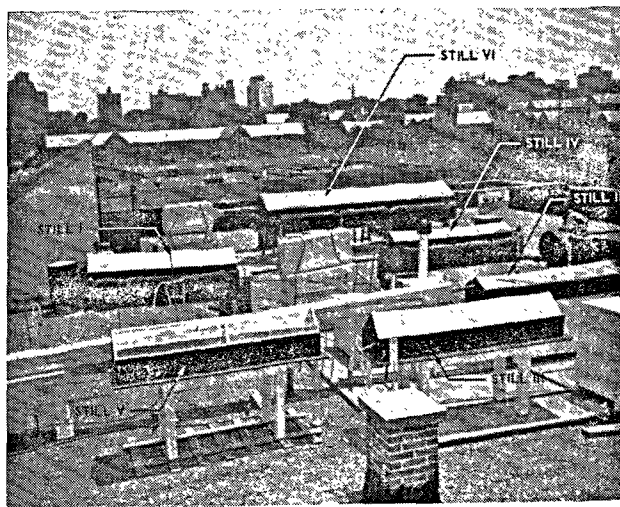


Figure 3. Over-all view of experimental stills at Georgia Institute of Technology, 1960 season

Physical description of stills: Still I [DNM] Deep basin; natural convection; Mylar; Still II [SFM] Shallow basin; forced convection; Mylar; Still III [SNT] Shallow basin; natural convection; Teslar; Still IV [DFM] Deep basin; forced convection; Mylar; Still V [SNG] Shallow basin; natural convection; glass; Still VI [DFT] Deep basin; forced convection; Teslar.

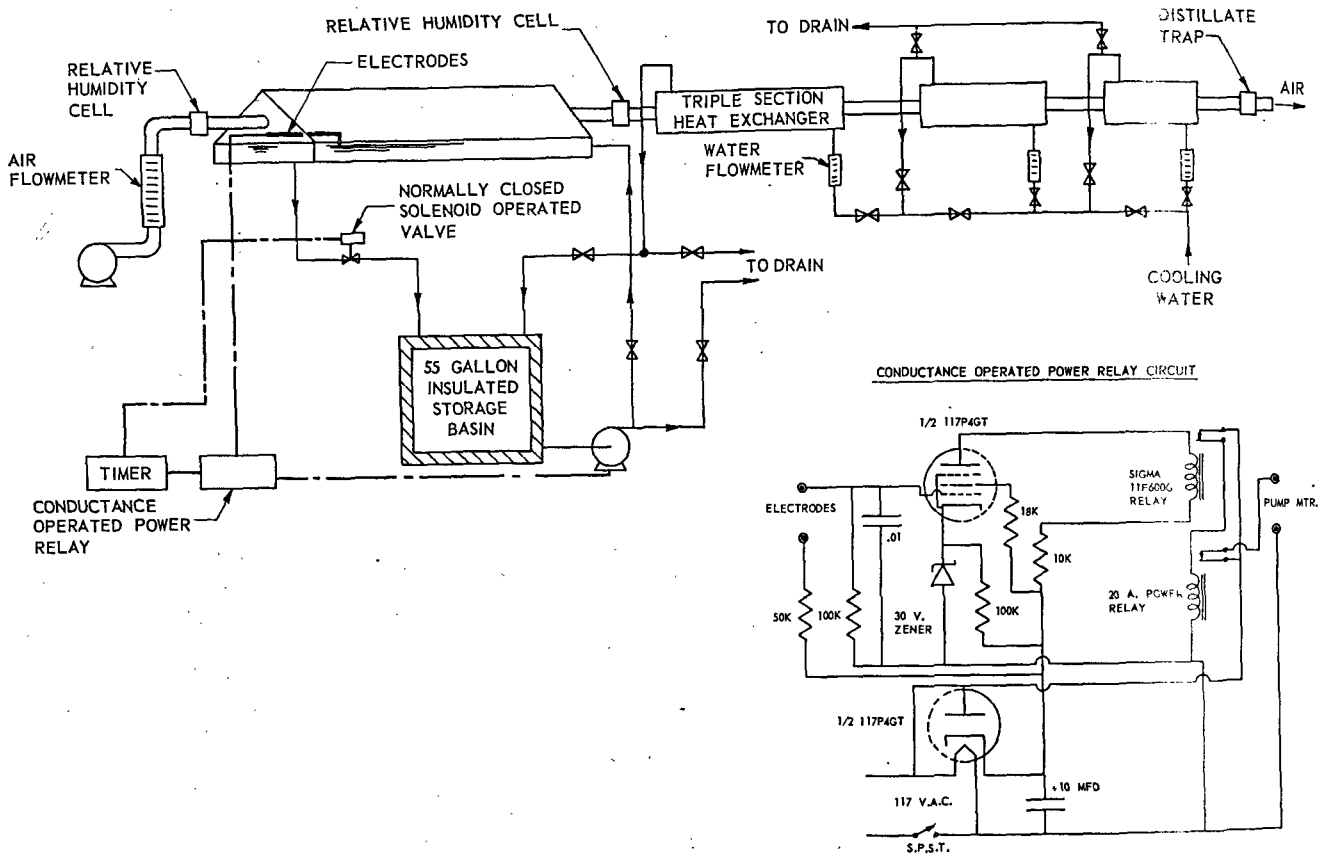


Figure 4. Storage system for excess condenser coolant

is absorbed by the black wick. A portion of the saline water evaporates from the wick, diffuses back through a porous film, condenses in another wick and drains to storage. The heat of condensation is transferred to a second evaporating wick, operating at the same total pressure but at a lower temperature.

#### MULTIPLE-DEPTH, FORCED-CONVECTION STILL

A series of solar stills may be arranged, as shown in figure 6, such that the first has a relatively deep layer of brine, the second a smaller brine depth, and so forth, until a very shallow basin is reached. The difference in brine depths causes a natural temperature gradient to be established during the day, due in part to the different heat capacity of each unit. Air is circulated over each basin in turn, becoming successively warmer with an increasing humidity until the final basin is reached, at which time it will have its highest temperature and moisture content. The air is then passed under each basin opposite to its previous direction, such that heat will be transferred from the air stream back into the basins having the deeper brine layers and lower temperatures. Further cooling may then be accomplished by passing the air steam from underneath the deepest basin to a heat exchanger, allowing the relatively warm air to give up a portion of its heat to the air leaving the heat exchanger, thus preheating it. Distillate may be collected from un-

derneath each basin (while heat is returned to the brine in the basins), from the heat exchanger where the condenser effluent is preheated, and from the external condenser.

When conditions are such that the temperature gradients between basins are reversed, the flow may be changed to pass the air first over the shallowest basin (which has given up most of its heat), then to the deeper basins which retain higher temperatures due to their higher thermal capacities. The saturated air is passed under each basin in succession to return the heat to the shallower basins, as shown in figure 6.

The efficiency of such a system tends to decrease as the difference in temperature between each basin decreases, until the normal operating characteristics of a forced-convection still are reached. The temperature difference, and hence the over-all efficiency, would tend to be increased by the use of multiple glazings for the shallow-basin units and by dispersion of the brine into the influent air stream for the deep-basin units.

This type of distiller may be constructed of plastic sheet tubing and the air piping may be greatly shortened and simplified beyond that shown in figure 6, by the use of valve arrangements. The economic aspects of this system have not been thoroughly investigated due to the lack of reliable production data.

MULTIPLE-EFFECT, CIRCULATING WATER SOLAR STILL

This process for the demineralization of sea water extends the concept of the forced-convection solar still by further separation of heat collection and evaporation units. A solar collector for trapping the sun's energy, a packed column for evaporation, and an external condenser for removing the vapor from the air stream are provided as separate items of equipment.

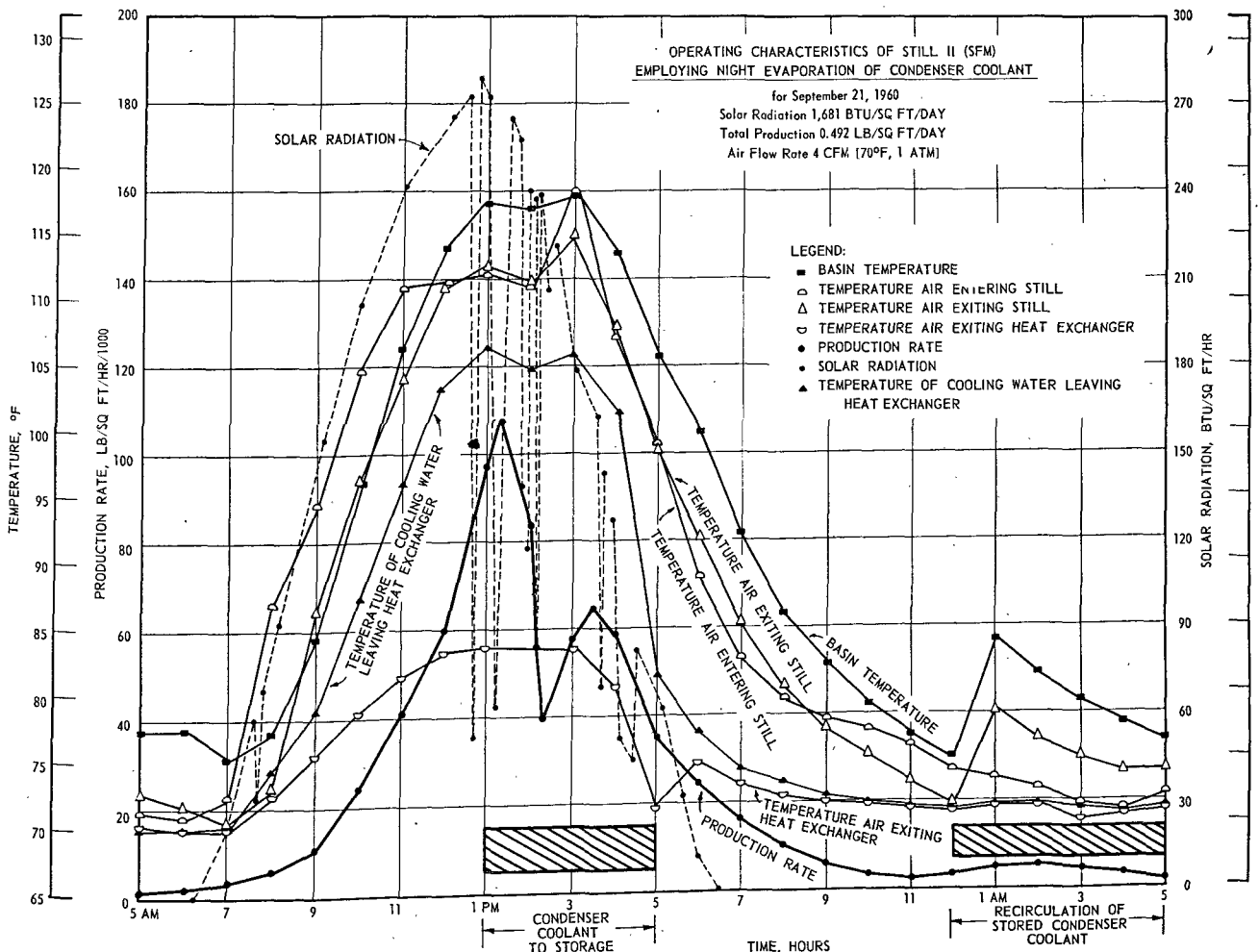
The process was conceived to combine the benefits of brine dispersion for increased evaporating surface and from re-use of the heat of condensation.

Dispersion may be achieved within the solar collector itself by the use of wicks or brine spray devices; however, a definite limitation is imposed on the process because the temperatures of heat collection and brine evaporation must necessarily be equal. This limitation is relaxed by completely separating the basic processes. It may be shown that the number of times the heat of condensation can be re-used is a function of the temperature of the two basic processes of energy collection and evaporation. Furthermore, with separation of all three of the basic processes, the only limitation on the multiple re-use of the heat of

condensation is the maximum temperature to which the brine can be heated in a solar collector and the minimum temperature at which cooling water is available. In addition, because each item of equipment serves only one function, all items may be independently engineered for maximum efficiency.

Figure 7 shows a flow sheet of the over-all process accompanied by mass and energy balances. The heated brine from the solar heater is cycled through a packed column, a water-to-water heat exchanger and a condenser, and then is recycled to the solar heater. Air is recirculated between the packed column and the condenser in a separate cycle. The water vapor created in the packed column, which goes into distillate production, is replaced by make-up brine from the heated cooling water.

Although the experimental work on this process has not been completed, the component parts have been used in various applications. Considerable operating experience has been gained with an external condenser in connection with forced convection solar stills, i.e. a heat exchanger operating at low temperatures. Solar heaters have been extensively used in some areas of the world and recent studies by the Fluor corporation (11), investigating



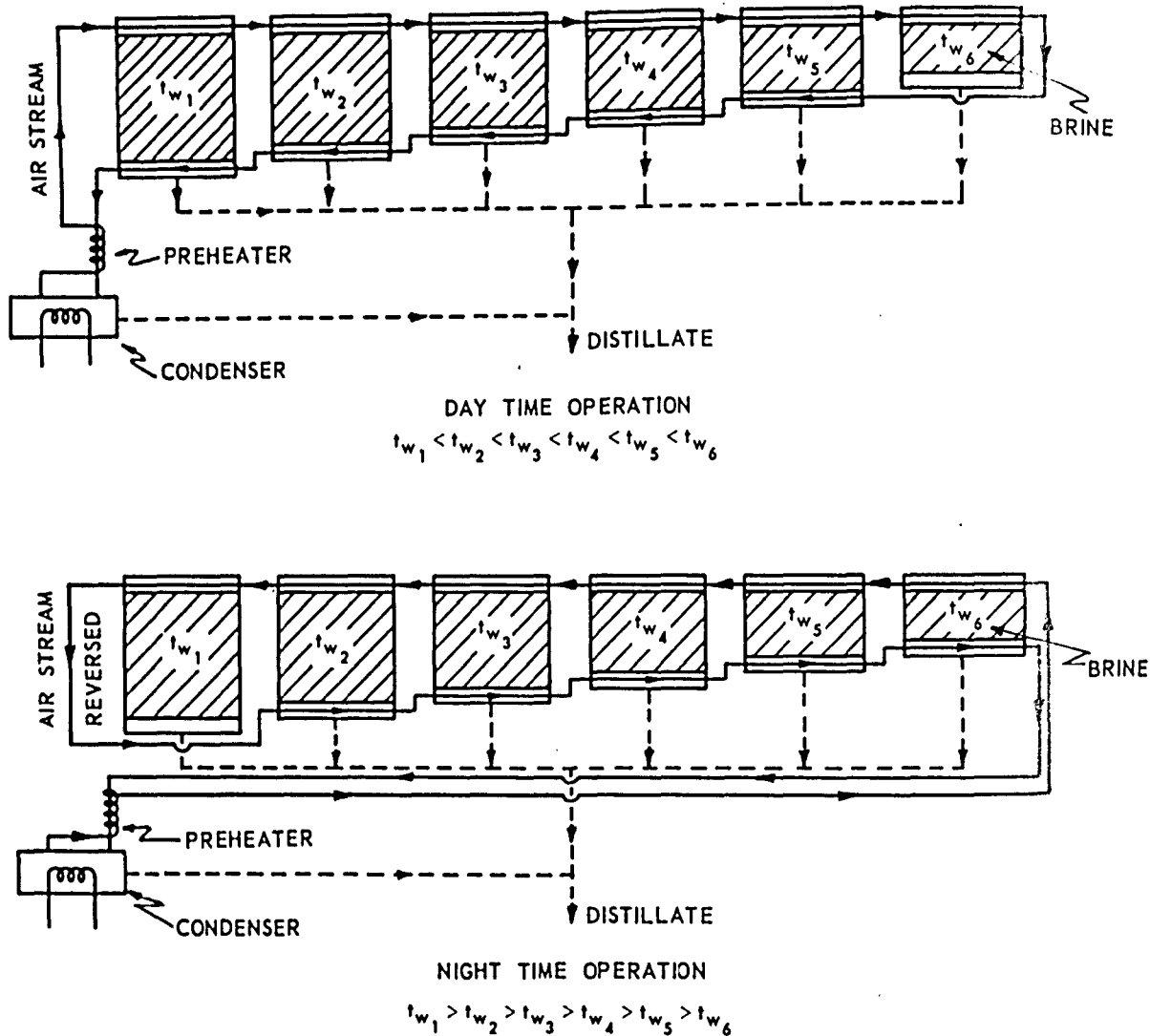


Figure 6. Flow diagram of multiple-depth, forced-convection still

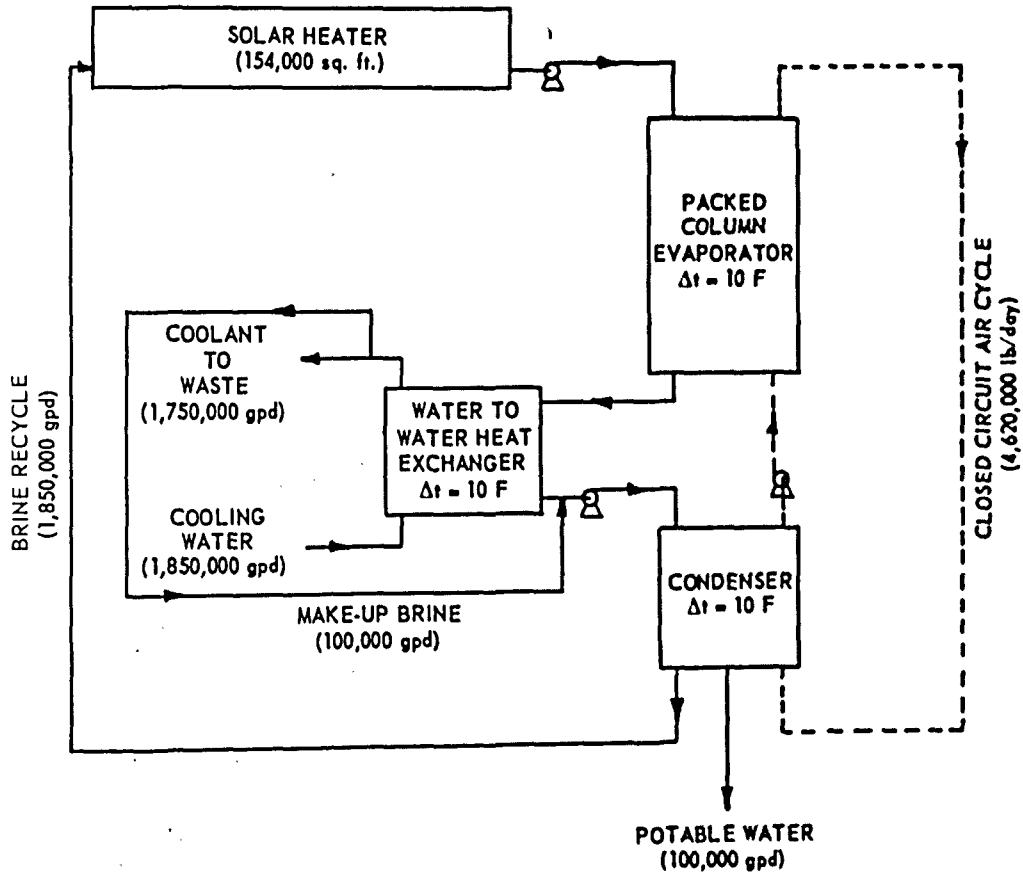
the feasibility of the specific application of solar water heaters to a desalting process, show that the solar collector may be constructed at a unit cost of U.S. \$0.34 per sq ft (excluding land costs). Packed columns have been widely used as absorption columns and cooling towers. However, additional research must be undertaken to economize their use as evaporators in this process.

The specific production of the process may be computed from the theoretical mass and energy balances shown in figure 7. These computations yield a production rate of 0.544 lb/sq ft/hr (0.06 gal/sq ft/hr), as shown in table 2.

It may be noted that the energy balances outlined in figure 7 include internal convection losses in the air cycle and consider the collection efficiency of the solar collector. The only losses of energy to the ambient air considered are those from the collector. Energy losses from other items of equipment are minimized by insulation and may be compensated

for in the water-to-water heat exchanger. The energy balances yield a production rate of 5.4 lb/sq ft/day (0.64 gal/sq ft/day) for a solar energy collection rate of 2 000 btu sq ft/day.

The improved economics of the process are derived from increased unit production rather than from decreased unit costs. The theoretical unit production of this process is from four to seven times as great as the unit production achieved by single-effect solar stills that employ one piece of equipment to accomplish all three basic functions. The best estimates, based on currently available cost information for a 100 000 gal/day plant, indicate that the cost of the product water may be reduced to near \$1.00 per 1 000 gallons. This approach takes into consideration improvements believed possible with further research and development. Additional information of the cost factors assumed for the economic analysis, based on a modification of the standardized procedure for estimating costs (12) is



MASS BALANCE

Overall	$w_4 = p = w_2(h_{s2} - h_{s1})$
Collector	$w_1 - w_1 = 0$
Packed Column	$w_1 - w'_1 + w_2 - w'_2 = 0$
Heat Exchanger	$w_3 - w_3 + w'_1 - w'_1 = 0$
Condenser	$w_4 + w'_1 - w_1 + w'_2(h_{s2} - h_{s1}) - w_2 = 0$

ENERGY BALANCE

Overall	$eq_s = w_3(t_{c2} - t_{c1}) c_p$
Collector	$eq_s = c_p w_1(t_{b1} - t_{b4})$
Packed Column	$(t_{b2} - t_{b1})(w_1) = w_2(h_{s2} - h_{s1}) h_{fg} + c_s w_2(t_{a2} - t_{a1})$
Heat Exchanger	$c_p w_3(t_{c2} - t_{c1}) = w_1 c_p(t_{b3} - t_{b2})$
Condenser	$c_p w_1(t_{b4} - t_{b3}) = w_2(h_{s2} - h_{s1}) h_{fg} + w_2 c_s(t_{a2} - t_{a1})$

Figure 7. Flow sheet of multiple-effect, circulating water solar still

Table 2. Operating conditions and production

(Based on 200 btu/sq ft/hr collection rate)

Plant size	$w_1$ (lb/hr)	$w_2$ (lb/hr)	$T_{b1}$ (°F)	$T_{b2}$ (°F)	$T_{b3}$ (°F)	$T_{b4}$ (°F)	$T_{a1}$ (°F)	$T_{a2}$ (°F)	$eq_s$ btu (ft <sup>2</sup> /hr)	$h_{s1}$ lb H <sub>2</sub> O vapor (lb dry air)	$h_{s2}$ lb H <sub>2</sub> O vapor (lb dry air)	$p$ (lb/hr)
One sq ft of horizontal collector area . . . . .	10	3	160	100	80	140	90	150	200	0.03118	0.21250	0.544
100 000 gpd . . . . .	1 540 000	462 000	160	100	80	140	90	150	200	0.03118	0.21250	83 300

presented below, in the section entitled "Economic analysis".

### Comparison of production with transmissivity and geometry of cover materials

Three types of cover materials were tested in conjunction with shallow-basin natural convection stills: Teslar, PVF type 20-A, 1.5 mil, at a 45° angle with the horizontal; Mylar, type W, 5 mil, at 30° and 45° with the horizontal; and sheet glass, triple strength, 7/32 in., at 30° and 45° with the horizontal. Production data were collected during the summer of 1960 and plotted against solar radiation, yielding the information set forth in table 3.

Table 3 shows that there is little difference in the performance between the still with a 30° Mylar cover and that equipped with a glass canopy. This similarity of performance may be explained by the similar transmissivities of the two types of cover materials (0.86 for glass and 0.85 for 5 mil Mylar). A comparison of productivities between the still with the 45° Teslar and that with the 45° glass indicates that the Teslar cover tends to produce more. A direct comparison is difficult to make in this case, because a difference in gutter areas between the two stills resulted in different effective absorption areas.

Transmissivity data for the various materials were obtained by placing a varying number of sheets of the material between the sun and an Eppley pyrliometer, such that the rays of the sun were perpendicular to the surface of the sheets. The transmissivity of the material was plotted against

the product of thickness and number of sheets. Such a plot is shown for 1.5 mil Teslar in figure 8. Droplet formation, similar to that occurring during still operation, could not be duplicated due to coalescence of the individual droplets. Data relating to the transmissivity of the wet films may best be obtained by placing a pyrliometer inside a still covered with the film to be tested.

### Economic analysis

The total economy of any process includes the energy cost, capital investment, and operational expenses. All of these must be included in order to estimate the total costs realistically. Reports made by numerous investigators in connection with the cost of construction and production are so varied that a comparison is impossible and published cost data are not consistent. In many of these reports, such items as taxes, land, interest, labor, and building costs are not adequately considered and, when estimated, the assumptions vary considerably.

The purpose of this study is not to compare the economy of still construction and operation with the cost reported in the literature, but to report what may be expected from the improved solar still design (Still IV) under conditions prevailing for Atlanta, Georgia. The analysis was performed in accordance with the modification of the standard procedure (12) established by the Office of Saline Water, U.S. Department of the Interior, to estimate the cost of saline water conversion. A sample calculation is shown in table 4.

Table 3. Expected daily production from natural convection stills

(shallow basin)

Canopy	Linear regression equation	Correlation coefficient (r)	Production <sup>a</sup> lb/sq ft/day
30° Mylar . . . . .	$P^b = 2.38 \times 10^{-4}S^c + 0.014$	0.835	0.490
45° Teslar . . . . .	$P = 3.32 \times 10^{-4}S - 0.041$	0.838	0.623
30° glass . . . . .	$P = 2.28 \times 10^{-4}S + 0.044$	0.667	0.500
45° glass . . . . .	$P = 1.86 \times 10^{-4}S + 0.070$	0.441	0.442

<sup>a</sup> Based on 2 000 Btu sq. ft./day

<sup>b</sup> P = total production, lb/sq. ft./day

<sup>c</sup> S = Solar radiation, Btu/sq. ft./day

Table 4. Modified cost analysis procedure

Capital costs (100 000 gals/day plant; 12.75 acres)	
1. Essential plant costs:	
(a) Special equipment (installed)	\$
Solar still frame, incl. insulation . . . . .	249 926
Still cover, Mylar type W, 5 mil. . . . .	19 244
(b) Standard engineering equipment (installed)	
Heat exchanger. . . . .	46 800
Blower (82 600 cfm). . . . .	4 420
Cooling water pump (2 500 gpm) . . . . .	3 250
TOTAL	323 640
TOTAL ESSENTIAL PLANT COSTS	433 678
2. Other plant costs:	
Raw water supply . . . . .	500
Product water storage . . . . .	1 000
Contingencies (2 per cent of above totals) . . . . .	8 704
Engineering (2 per cent of above totals). . . . .	8 878
Interest on investment during construction (4 per cent) . . . . .	18 110
Site \$6/1 000 gal prod./stream day . . . . .	600
TOTAL	37 792
TOTAL PLANT INVESTMENT	471 470
<i>Operating costs</i>	
	<i>Cost per stream day</i>
	\$
Electric power (below 100 000 kW) . . . . .	7.52
Supplies and maintenance materials (0.0015 per cent tpi) . . . . .	7.07
Operation and maintenance labor (2 men/day) . . . . .	40.00
Amortization (rate, 4 per cent/yr):	
(a) Mylar (4 yr. life) . . . . .	15.78
(b) Equipment (20 yr. life) . . . . .	101.30
Taxes and insurance (0.006 per cent tpi) . . . . .	28.29
Interest on working capital (above $\times$ 0.00725) . . . . .	1.45
TOTAL OPERATING COSTS	201.41
Cost per 1 000 gal product. . . . .	2.01

Table 5. Comparison of cost estimates

(Based on 100 000 gpd plant)

	1	2	3	4	5	6
Glazing material (thickness) . . . . .	Mylar (3 mil)	Teslar (3 mil)	Glass (1/8 in)	Glass (3/16 in)	Teslar (4 mil top) (1 mil inner) (3 mil bottom)	Teslar (4 mil top) (1 mil inner) (3 mil bottom)
Unit cost of glazing material (\$/sq ft) . . . . .	0.03	0.03	0.188	0.41	0.17	0.17
Useful life (years) . . . . .	4	5	20	20	5	5
Angle of glazing with horizontal (degrees) . . . . .	30	0	0	0	0	0
Unit cost still frame (\$/sq ft) . . . . .	0.45	0.45	0.45	0.45	0.14	0.14
Useful life (years) . . . . .	20	20	20	20	50	50
Essential plant costs, total pie (installed) . . . . .	\$326 340	\$321 058	\$408 809	\$532 105	\$131 998	\$154 206
Other plant costs, total plant investment . . . . .	\$471 470	\$467 724	\$594 956	\$773 722	\$193 608	\$225 807
Total capital costs . . . . .	\$483 530	\$479 484	\$608 576	\$790 582	\$200 988	\$234 027
Cost per gallon per day of production . . . . .	\$4.84	\$4.79	\$6.09	\$7.91	\$2.01	\$2.34
Total essential operating costs. . . . .	\$54.59	\$54.54	\$56.44	\$59.61	\$57.94	\$58.43
Cost for 1 000 gal of product water . . . . .	\$2.01	\$1.96	\$2.27	\$2.81	\$1.23	\$1.37

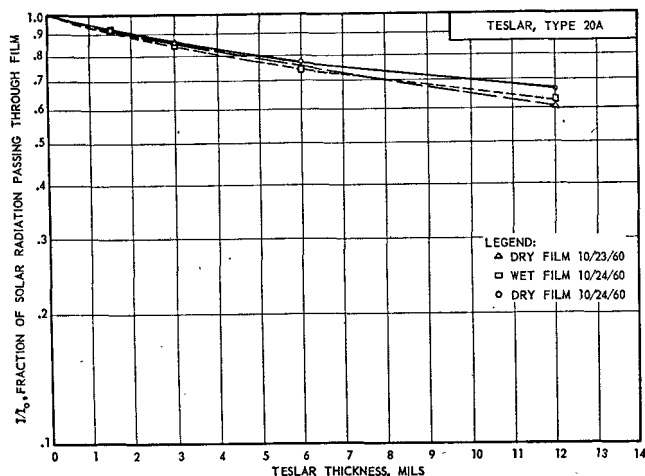


Figure 8. Absorption properties of Teslar

All cost estimates are based on a 100 000 gallon per day plant. For the purpose of the analysis, the following factors were varied:

- Type and thickness of glazing material (Mylar, Teslar, glass);
- Angle of glazing with the horizontal ( $0^\circ$  and  $30^\circ$ );
- Type of still frame construction (unit cost);
- Useful life of glazing material and still frame.

The results presented in table 5, columns 1-4 are based on the measured production of 0.180 gal/sq ft/day. As may be seen from table 1, the average yield from this still was 0.181 gal/sq ft/day for a six-day period with an average solar intensity of 1 905 btu/sq ft/day. The cost analysis for the multiple-effect, circulating water solar still, shown in columns 5 and 6 of table 5 is based on a production of 0.64 gal/sq ft/day (100 per cent efficiency) and 0.45 gal/sq ft/day (70 per cent efficiency) at an assumed solar intensity of 2 000 btu/sq ft/day.

### Conclusions

Depending on operating conditions and design, a forced-convection still may be expected to produce from below to nearly twice that of a natural-convection still.

There is a well-defined optimum air flow rate for a forced-convection still.

High apparent efficiencies may be encountered due to extraction of moisture from the ambient air by the condenser of a forced-convection distiller. The heat exchanger effluent air should be recycled if its enthalpy exceeds that of the ambient air.

Under closely controlled conditions, night evaporation of condenser coolant can appreciably increase the over-all efficiency.

Mylar film, when used as the cover material, performs nearly as well as glass, with slight differences due to the transmissivities.

Considerable further improvement of the unit cost of fresh-water production appears possible from the two proposed multiple-effect systems.

It appears that saline water conversion may be achieved in the realm of \$1.000 per thousand gallons of product water.

### Acknowledgements

The authors acknowledge the assistance of a number of colleagues and assistants: Mr. R. B. Hughes, who constructed the stills and most of the experimental apparatus; Messrs. L. R. Kirk, G. W. Gibson and J. M. Gutermuth, who assisted in data reduction; and Mr. E. E. Ozburn, who edited the manuscript.

Acknowledgement is also given for the splendid co-operation on the part of a number of the staff members of the Office of Saline Water U.S. Department of the Interior, and, in particular Joseph J. Strobel, L. J. Winchester and Paul Pruett. The authors are also indebted to Dr. G. O. G. Löff, Consulting Chemical Engineer, for his suggestions and encouragement during these investigations.

This research program is sponsored by the Office of Saline Water, U.S. Department of the Interior, contract No. 14-01-001-178. The authors are also indebted for the active support of this work by the Engineering Experiment Station, Georgia Institute of Technology.

### Appendix A

#### GLOSSARY OF TERMS

- $w_1$  = water flow rate through the solar collector
- $w'_1$  = water flow rate leaving the packed column
- $w_2$  = moist air flow rate leaving the condenser
- $w'_2$  = moist air flow rate leaving the packed column
- $w_3$  = cooling water flow rate
- $w_4$  = make up water flow rate
- $c_p$  = specific heat of water
- $c_s$  = humid heat of moist air
- $e$  = collector efficiency
- $q_s$  = solar radiation
- $p$  = production rate of potable water
- $h_s$  = absolute humidity of moist air
- $T_{a1}$  = temperature of air-vapor mixture entering packed column
- $T_{a2}$  = temperature of air-vapor mixture leaving packed column
- $T_{b1}$  = temperature of brine entering packed column
- $T_{b2}$  = temperature of brine leaving packed column
- $h_{s1}$  = absolute humidity of air-vapor mixture entering packed column, lb  $H_2O$ /lb dry air
- $h_{s2}$  = absolute humidity of air-vapor mixture leaving packed column, lb  $H_2O$ /lb dry air



## APPENDIX B

## DAILY STILL PRODUCTION (LB/SQ FT)

Date (1968)	Solar still No.										Solar radiation btu/sq ft/day
	I	II	III	IV <sub>a</sub>	IV <sub>b</sub>	IV <sub>T</sub>	V	VI <sub>a</sub>	VI <sub>b</sub>	VI <sub>T</sub>	
7/12	.338	—	.504	.055	.700	.754	.527	.003	1.088	1.091	2 080
7/13	.373	—	.819	.026	.854	.879	.578	0	.975	.975	2 282
7/14	.381	.206	.455	.083	.544	.627	.386	.024	.898	.923	1 559
7/15	.411	.362	.813	.102	.443	.545	.653	.051	.890	.940	2 368
7/16	.415	.375	.750	.091	.579	.670	.595	.047	.975	1.021	2 320
7/17	.413	.331	.707	.067	.394	.461	.597	.037	1.005	1.037	2 075
7/18	.384	.325	.687	.449	.508	.957	.594	0	.912	.912	2 330
7/19	.341	.595	.357	.075	.653	.728	.573	.005	.750	.756	1 242
7/20	.329	.400	.771	.070	.648	.719	.480	.017	.955	.972	2 296
7/21	.431	.411	.844	.390	.944	1.334	.637	.041	.914	.955	2 338
7/22	.253	.303	.496	.260	.975	1.235	.363	.025	1.044	1.069	1 645
7/23	.399	.373	.730	.362	1.039	1.401	.517	.066	.855	.922	2 039
7/24	.379	.391	.728	.295	1.108	1.404	.498	.052	.921	.923	2 150
7/25	.424	.453	.822	.339	1.147	1.486	.620	.055	.992	1.046	2 304
7/26	.421	.374	.679	.323	1.129	1.452	.434	.031	1.069	1.099	2 019
7/27	.381	.117	.290	.343	.605	.950	.385	.032	.653	.686	949
7/28	.250	.007	.136	.246	.263	.508	.135	.006	.288	.294	609
7/29	.229	.316	.626	.269	.749	1.018	.405	.019	.623	.642	1 920
7/30	.260	.211	.657	.307	.818	1.125	.374	.021	.764	.785	1 723
7/31	.296	.288	.512	.316	.856	1.171	.416	.029	.804	.832	1 822
8/1	.313	.254	.368	.330	.780	1.110	.453	.034	1.044	1.078	2 029
8/2	.170	.492	.673	.336	1.064	1.400	.613	.074	.871	.945	2 033
8/3	.399	.501	.637	.288	.838	1.125	.384	.033	.834	.866	1 614
8/4	.375	.788	.760	.310	1.200	1.509	.743	.064	.888	.952	2 237
8/5	.330	.264	.293	.327	.717	1.044	.370	.019	.680	.699	998
8/6	.322	.645	.722	.656	.744	1.400	.508	.009	.856	.865	2 119
8/7	.370	.665	.737	.455	.821	1.276	.593	.036	1.061	1.097	2 163
8/8	.295	.351	.366	.365	1.032	1.398	.237	.008	.729	.738	1 251
8/9	.329	.282	.351	.420	.962	1.346	.570	.050	.581	.631	1 093
8/10	.265	.273	.285	.361	.940	1.301	.742	.002	.576	.577	1 156
8/11	.123	.067	.143	.336	.646	.982		.019	.338	.357	638
8/12	.171	.261	.366	.364	.813	1.177	.241	.019	.481	.501	1 293
8/13	.182	.457	.609	.365	.993	1.358	.437	.050	.473	.522	856
8/14	.225	.316	.475	.308	1.057	1.365		.025	.665	.690	1 316
8/15	.231	.213	.261	.330	.806	1.137	.368	.040	.595	.635	1 211
8/16	.254	.616		.336	1.147	1.483	.436	.056	.688	.744	1 817
8/17	.383	.520	.506	.260	1.106	1.366	.430	.070	.745	.815	1 932
8/18	.298	.394	.518	.186	.889	1.074	.442	.071	.715	.785	1 873
8/19	.316	.602	.425	.206	1.133	1.339	.365	.048	.696	.744	1 678
8/20	.295	.257	.430	.148	1.178	1.325	.396	.024	.677	.700	1 756
8/21	.335	.743	.506	.177	1.179	1.356	.247	.051	.776	.827	2 107
8/22	.316	.297	.376	.206	.919	1.125	.271	.035	.608	.644	946
8/23	.270	.487	.379	.201	1.065	1.266	.432	.002	.613	.615	1 779
8/24	.266	.478	.401	.169	.734	.904	.321	.058	.613	.671	1 519
8/25	.251	.234	.221	.140	.787	.927	.238	.047	.503	.549	1 102
8/26	.199	.195	.268	.214	.838	1.052	.179	.028	.439	.467	1 147
8/27	.168	.226	.214	.131	.834	.965	.316	.017	.439	.456	1 202
8/28	.287	.499	.618	.176	1.196	1 372	.667	.063	.675	.738	2 124
8/29	.336	.407	.546	.170	1.135	1.305	.504	.086	.749	.835	1 976
8/30	.329	.651	.588	.177	1.375	1.552	.471	.059	.988	1.047	1 957
8/31	.332	.387	.523	.214	1.205	1.420	.419	.080	.801	.881	1 433
9/1	.279	.097	.347	.211	.979	1.190	.485	.060	.544	.604	1 118
9/2	.254	.508	.450	.209	1.106	1.315	.384	.036	.661	.697	1 828
9/3	.308	.564	.529	.186	1.216	1.402	.421	.025	.804	.829	1 949
9/4	.073	.432	.384	.167	1.193	1.359	.295	.036	.731	.767	1 488
9/5	.323	.235	.530	.744	.737	1.481	.411	.051	.789	.840	1 905
9/6	.321	.632	.510	.319	1.215	1.535	.383	.034	.813	.847	1 746
9/7	.277	.413	.405	.303	1.135	1.438	.295	.027	.718	.744	1 477
9/8	.305	.425	.387	.288	1.097	1.385	.339	.044	.664	.709	1 590
9/9	.309	.555	.516	.272	1.235	1.507	.379	.032	.726	.758	1 769
9/10	.295	.452	.413	.260	1.155	1.415	.344	.049	.696	.744	1 621

## APPENDIX B (continued)

## DAILY STILL PRODUCTION (LB/SQ FT)

Date (1960)	Solar still No.										Solar radiation btu/sq ft/day
	I	II	III	IV <sub>a</sub>	IV <sub>b</sub>	IV <sub>T</sub>	V	VI <sub>a</sub>	VI <sub>b</sub>	VI <sub>T</sub>	
9/11 . . . . .	.367	.378	.361	.259	1.013	1.272	.280	.073	.614	.686	1 436
9/12 . . . . .	.384	.189	.410	.332	.873	1.205	.469	.136	.599	.735	2 081
9/13 . . . . .	.380	.378	.393	.311	.774	1.085	.414	.161	.548	.708	2 094
9/14 . . . . .	.274	.248	.317	.164	.490	.653	.284	.075	.374	.446	1 489
9/15 . . . . .	.182	.047	.217	.150	.400	.550	.127	.051	.245	.296	503
9/16 . . . . .	.070	.088	.225	.140	.475	.614	.204	0	.226	.226	583
9/17 . . . . .	.049	.197	.283	.153	.653	.806	.276	.001	.283	.284	766
9/18 . . . . .	.183	.361	.360	.208	.208	.308	.311	.060	.464	.524	1 480
9/19 . . . . .	.280	.482	.488	.283	.842	1.125	.427	.026	.590	.615	1 904

## References

- Thimann, K. V., Solar Utilization by Higher Plants, *Proceedings, World Symposium on Applied Solar Energy* (Jorgenson and Company), San Francisco, California (1956), p. 255.
- Duffie, J. A., Löf, G. O. G. and Salem, E. M. A., Solar Heat Exchangers, *Chemical Engineering Progress*, 56, p. 67 (1960).
- Löf, G. O. G., Demineralization of Saline Water with Solar Energy, Saline Water Conversion Program, R. and D., Progress Report No. 4, 18-74 (1954).
- Abbot, C. G., U.S. Patent no. 2 141 330 (1938).
- Abbot, C. G., Utilizing Heat from the Sun, *Smithsonian Misc. Collection*, 98, no. 5 (1939); Solar Radiation as a Power Source. *Smithsonian Report for 1943*, p. 99; U.S. Patent 2 247 830 (1941); U.S. Patent 2 460 482 (1949).
- Landry, B. A., Eibling, J. A. and Thomas, R. E., An Investigation of Multiple-Effect Evaporation on Saline Waters by Steam from Solar Radiation. Report from Battelle Memorial Inst. to U.S. Dept. of Interior, December 1953.
- Coanda, H., Process and Apparatus Designed for Separating the Liquid and Mineral Elements from Sea Water or Similar Substance. French Patent no. 647 350.
- Dornig, M. and Belloni, A., Device for the Production of Distilled Water by Means of Solar Energy. Italian Patent no. 448 833 (1949).
- Oxford, C. W., Design, Construction and Operation of a Pilot Distilling Plant Based on Solar Energy. Unpublished Research proposal from Univ. of Arkansas to U.S. Dept. of Interior (1954).
- Ginnings, D. C., Multiple Effect Solar Still. U.S. Patent no. 2 445 350 (1948).
- Feasibility Study of a Combined Solar Heater Multi-stage Flash Evaporator for Sea Water Conversion. The Fluor Corporation, Ltd. Prepared for Dept. of Water Resources, State of California (1960).
- A Standard Procedure for Estimating Costs of Saline Water Conversion. U.S. Dept. of the Interior, Office of Saline Water, March 1956.

## Summary

The state-of-the-art of solar distillation has progressed over the years, but further research and development are needed in order to achieve an economically competitive status in the field of saline water conversion.

One approach to minimizing unit conversion cost is to first develop high unit productivity from a given process and then to optimize the components by improved engineering design.

This approach led to the development of a forced-convection still with an external condenser. The internal efficiency of this still was increased by dispersion of the basin water to increase the rate of mass transfer to the condensing surfaces, relative to the thermal heat losses. The maximum production obtained from this design was 0.186 gal/sq ft/day with a solar intensity of 1 957 btu/sq ft/day. It

was found that a well-defined optimum air flow rate exists and that operation at this optimum air flow is critical to forced-convection still performance. During the operation of this still, some high apparent efficiencies were encountered due to the extraction of water vapor from the ambient air by the condenser. A contribution was obtained equivalent to as much as one-third of the total collected solar radiation. It was established that when the enthalpy of the air leaving the condenser exceeds that of the ambient air, recycling of the heat exchanger effluent becomes advantageous.

Storage of heat exchanger coolant during the period of highest temperature operation was investigated. Limited success with this heat economy measure demonstrated its feasibility under more carefully controlled conditions.

The application of the multiple-effect principle to solar processes for desalting saline water was also investigated. Two processes appear technically and economically feasible. The first of these involves the use of temperature gradients developed in a series of basins of varying depths, which allow the heat of condensation of product distillate from shallow basins to be recovered by deep basins during the day, and that from deep basins to be recovered by shallow basins during the night. Additional production is obtained from an external condenser. The other process, which promises a much higher specific productivity, involves the separation of the three basic processes of energy collection, evaporation, and condensation. This feature permits the recovery of the heat of condensation for return to the system. Evaporation of hot water from the energy collector occurs in a packed column, by direct contact with a closed air cycle. After leaving the packed column, the brine is further cooled and passed through a condenser, where it recovers the heat of condensation and returns it to the collector. Preliminary estimates indicate that three effects are readily attainable.

The best estimates for the unit cost of product water, based on currently available information, indicate that a 100 000 gal/day plant may convert saline water at around \$1.000 per thousand gallons.

Experiments were performed with various canopy materials at different angles with the horizontal. Studies with 5 mil Mylar and triple-strength glass at a 30° slope indicated that both materials performed equally well, with glass producing slightly more, in proportion to the transmissivities.

Several economic comparisons were made to determine the effect of various component costs and increased specific productivities on the unit cost of conversion. The comparisons show that either reduction of unit collector construction costs or the decrease of required collector area is necessary to effect a significant cost reduction. These conclusions verify observations made by other investigators. In the case of forced convection and multiple-effect solar distillation processes, the decrease in the unit cost of conversion is achieved from increased specific productivity rather than from decreased unit costs.

## ALAMBIC SOLAIRE A MULTIPLE EFFET ET A CONVECTION FORCÉE POUR LE DESSALAGE DES EAUX DE MER ET SAUMÂTRES

### Résumé

La distillation solaire a fait des progrès au cours de ces dernières années, mais il faut procéder à de nouvelles recherches et à d'autres mises au point pour qu'elle soit en mesure de faire concurrence aux autres procédés utilisés pour la conversion des eaux salines.

Un moyen de réduire les frais de conversion unitaires consiste à réaliser tout d'abord une grosse productivité unitaire, puis à perfectionner les éléments constitutifs du système en améliorant leur conception.

Cette méthode aboutit à la mise au point d'un alambic à convection forcée avec condenseur extérieur. Le rendement interne de l'alambic a été augmenté, dans ce cas, par la dispersion de l'eau du bassin en vue d'augmenter le taux de transmission de masse aux surfaces de condensation par rapport aux pertes thermiques. La production maxima qu'autorisa cette formule fut de 0,186 gallon par pied carré et par jour, avec une intensité solaire de 1 957 Btu par pied carré et par jour. On a établi qu'il existe un débit d'air idéal bien défini et que le fonctionnement à ce débit est d'importance critique en ce qui concerne la bonne marche d'un alambic à convection forcée. On observa de gros rendements apparents pendant le fonctionnement de cet alambic, en raison de l'extraction de vapeur d'eau de l'air ambiant par le condenseur. On réalisa ainsi une fraction équivalente à une valeur atteignant le tiers du rayonnement solaire total récupéré. On a établi que, lorsque l'enthalpie de l'air qui sort du condenseur dépasse celle de l'air

ambiant, il devient avantageux de refaire passer l'effluent de l'échangeur de chaleur par le circuit.

On a étudié la mise en réserve du liquide de refroidissement de l'échangeur de chaleur pendant la période de fonctionnement à la température la plus élevée. Le succès limité obtenu avec cette mesure, conçue pour économiser la chaleur, en a démontré la praticabilité dans des conditions plus soigneusement contrôlées.

On a également étudié l'application du principe des effets multiples au procédé utilisant l'énergie solaire pour le dessalage des eaux saumâtres. Deux procédés semblent techniquement et économiquement réalisables. Le premier de ceux-ci comporte l'utilisation de gradients de température créés dans une série de bassins ayant des profondeurs différentes, ce qui permet à la chaleur de condensation du distillé produit dans les bassins peu profonds d'être récupérée pendant la journée par les bassins profonds, avec une récupération de la chaleur produite dans les bassins profonds par les bassins de faible profondeur pendant la nuit. On obtient un supplément de production au moyen d'un condenseur extérieur. L'autre procédé, qui promet de donner une productivité spécifique beaucoup plus grande, fait intervenir la séparation des trois processus fondamentaux que sont la récupération de l'énergie, l'évaporation et la condensation. Cette caractéristique permet la récupération de la chaleur de condensation en vue de son retour au système. L'évaporation d'eau chaude du collecteur d'énergie

se produit dans une colonne garnie en contact direct avec un cycle d'air fermé. Après sa sortie de la colonne garnie, la saumure est encore refroidie et passe par un condenseur, dans lequel elle récupère sa chaleur de condensation et la renvoie au collecteur. Les évaluations préliminaires indiquent que trois effets peuvent être réalisés facilement. Les évaluations les plus exactes pour le coût de l'eau produite, sur la base des renseignements actuellement disponibles, indiquent qu'une usine produisant 100 000 gallons par jour peut assurer la conversion de l'eau saumâtre à un prix inférieur à un dollar par mille gallons.

On a exécuté des expériences avec divers matériaux de recouvrement, inclinés à divers angles sur l'horizontale. Les travaux faits avec du Mylar de 5 millièmes de pouce d'épaisseur et du verre triple incliné à 30° indiquèrent que les deux matériaux donnaient

d'aussi bons résultats, le verre débitant un peu plus proportionnellement aux transmissibilités.

On procéda à plusieurs comparaisons économiques pour déterminer les répercussions des frais afférents aux divers éléments et celles de l'augmentation des productivités spécifiques sur le coût unitaire de conversion. Ces comparaisons indiquent qu'il faut, soit réduire le coût unitaire de construction du collecteur, soit diminuer la surface de collecteur nécessaire, pour réaliser une réduction significative des frais. Ces conclusions confirment les observations faites pas d'autres chercheurs. Dans le cas des procédés de distillation solaire à convection forcée et à multiple effet, la réduction du coût unitaire de conversion est réalisée à partir d'une augmentation de la productivité spécifique plutôt que par une réduction du coût unitaire.

## DEMINERALIZATION OF SALINE WATER BY SOLAR RADIATION IN THE UNITED ARAB REPUBLIC

*M. M. Hafez and M. K. Elnesr \**

The cultivated area in Egypt forms a narrow strip on both sides of the Nile; the rest of the country, constituting 97 per cent of the whole area, is arid and suffers from difficult communications, expensive transportation and absence of fuel. In many parts of the desert, underground water is available. It is mainly brackish, having a total mineral content between 1 500 and 20 000 parts per million (ppm). Water is considered acceptable in these areas for irrigation, and for human or stock consumption when the mineral content is low, i.e. up to 3 000 ppm. (Usually, animals have a relatively high tolerance for salinity in water—up to 10 000 ppm.)

The development of these remote arid areas requires reducing the salt content of the brackish water or the sea water (35 000 ppm.) available along the Red Sea and the Mediterranean. The conventional techniques of saline water demineralization are not practical, owing to the high cost of power and the lack of skilled labour for installation and maintenance. On the other hand, the possibility of substituting solar energy for fuel seems promising as it eliminates the cost of fuel. Moreover, these areas are characterized by their favourable climatic conditions, high solar intensity and long sunshine duration (see tables 1-4).

In this paper, we give the results of work intended to develop and improve various solar demineralization stills, whose performance data will certainly lead to reduction of both capital investment costs and operation and maintenance costs.

### Preliminary experiments

One way to lower costs of distilled water from solar stills would be to find units of high efficiency. For this reason, various small mobile stills were constructed and tested. The experimental studies undertaken can be summarized as follows.

(a) An L-shaped wooden still (50 cm wide  $\times$  100 cm long) was first constructed. It was covered by a single glass pane inclined at 25 degrees to the horizontal. Its impermeable base was covered by a stretched, black, loose-woven loth, kept continuously wet by immersing its two ends in a reservoir containing the saline water. The purpose of this procedure was to increase the water production by letting only a thin layer of the brine be exposed to

solar radiation. This would permit rapid evaporation and reduction of loss of heat stored as sensible heat in the brine. After running the experiment, it was found that the feed by the cloth was not as rapid as the evaporation, causing its uneven wetting. The difficulty was obviated by placing along the still a tubing with holes drilled in it, which served the purpose of spraying the brine on the cloth. Although the yield was increased by about 20 per cent when compared with a similar still provided with an evaporator tray, the experiment was abandoned, as we were looking for simply constructed equipment which could be carried out by personnel without special training.

It was that the shadows of the sides and back of the still shield an appreciable fraction of the evaporator area from the solar radiation, especially at low angles of the sun, and that any excess of water left in the tray at sunset represents stored heat to be lost at night.

(b) A different design was then tested. It was based on the preheating of the brine by solar energy. An insulated reservoir covered with double glass was used. It contained the brine, which was covered with a thin layer of oil to prevent evaporation from its surface. The purpose of this design was to increase the yield by reducing the time required for the brine to reach its distillation temperature, and by increasing the effective length of the distilling day, as evaporation and condensation would continue after sunset due to the higher temperature of the brine and the lower temperature of the glass affected by nocturnal cooling.

When running the experiment, the results obtained were not encouraging. The increase in the yield was small (less than 10 per cent), not justifying the high cost of the preheating unit.

(c) It was found in the previous tests that wood and rubber are not suitable in hot countries. An aluminium still (figure 1) was then constructed. It has the advantage that (i) its cover, which is of the roof type, is foldable and can be easily attached to the outer side of the base when transported; (ii) it is provided with a small reservoir which feeds the still with the brine, so that its level in the evaporator tray is continuously the same; and (iii) repairs are practically non-existent.

The still was tested daily from 10 July to 10 August 1960. The duration of each test was 24 hours, starting and ending at 9 a.m. local time. The mean daily

\* National Research Centre, Cairo.

Table 1. Mean daily values of total solar radiation (ly/day) received on a horizontal surface at Giza (30° 2'N, 31° 13'E)

Year	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
1956. . .	290	375	519	576	643	633	607	566	526	421	306	248
1957. . .	287	397	493	582	595	672	665	630	547	413	298	282
1958. . .	276	386	520	576	622	654	643	598	518	411	287	241
Mean . .	285	386	511	578	626	653	638	598	530	415	300	257

Table 2. Number of days in per cent of all days for which the radiation has exceeded certain limits (Giza)

Radiation received (ly/day)	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
> 300. . .	54	91	99	100	99	100	100	100	100	95	70	29
> 400. . .	—	42	87	93	97	100	100	100	99	67	2	—
> 500. . .	—	4	58	85	92	100	100	99	84	7	—	—
> 600. . .	—	—	8	57	83	99	81	55	7	—	—	—
> 700. . .	—	—	—	—	3	4	5	—	—	—	—	—

Table 3. Mean monthly values of sunshine duration per day at Giza

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Sunshine duration (hours) . . . . .	6.9	8.2	9.1	10.4	12.1	13.2	13.0	12.4	11.3	9.9	8.6	7.5
Per cent of possible sunshine. . . . .	66	73	76	82	88	94	93	93	92	87	80	73

Table 4. Number of days in per cent of all days for which the duration has exceeded certain limits (Giza)

Sunshine duration (hours)	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
> 5. . .	73	86	91	92	97	100	100	100	100	95	89	81
> 9. . .	29	40	47	77	91	100	99	100	97	65	50	21
> 12. . .	—	—	—	4	39	58	39	11	—	—	—	—

water yield was about 5.5 litres per square meter, corresponding to an efficiency of 42 per cent. (Efficiency is defined as the ratio of the actual to the theoretical water yield, which is one gm of distilled water for 600 calories.)

### Construction of permanent base stills

The development of the arid areas requires the installation of large-scale plants producing water sufficient for the daily consumption of family or collective dwellings. For this reason, an experimental solar distilling plant was constructed in a desert area near Cairo.<sup>1</sup> It consists of two units; each has a permanent concrete base of an area 20 meters square (2 m wide × 10 m long). The pan was waterproofed

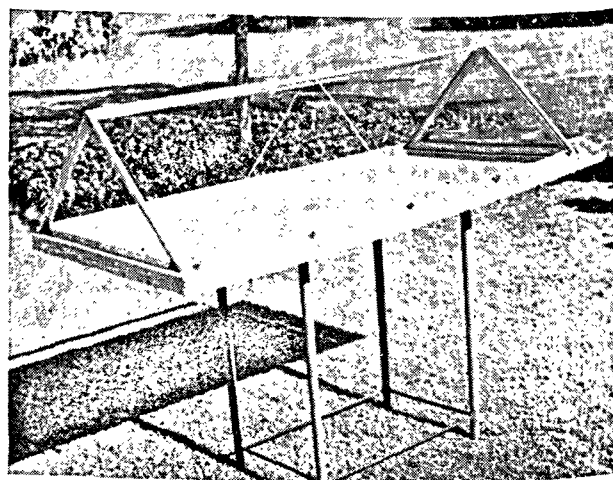


Figure 1

<sup>1</sup> The authors wish to express their thanks to Dr. Ibrahim H. Abdel Rahman for proposing the construction of this still and for his continuous interest.

Table 5. Monthly values of the daily water yield  
(Litres per sq meter)

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	July	Aug.	Sept.	Oct.
Number of runs . . . . .	25	20	23	29	14	30	31	30	19
Mean daily yield . . . . .	0.44	1.25	1.90	2.72	3.62	3.67	3.18	2.86	1.02
Maximum daily yield . . . . .	0.57	1.70	2.55	3.55	4.30	4.25	3.70	3.45	2.40
Minimum daily yield . . . . .	0.35	0.65	1.55	1.75	3.20	2.70	2.70	2.10	1.50

and blackened with a thin layer of asphalt. The glass cover was fixed on a metallic framework, inclined 30 degrees to the horizontal.

The installation was tested for nearly a whole year. The data collected show considerable fluctuations of the daily water yield. Table 5 gives a summary of the results for each month of the year, except those for June, as those were found to be in error due to a break discovered at some joints of the collecting channels.

When plotting the mean daily water yield  $L$ , against the corresponding mean horizontal intensity  $Q$ , recorded at the agro-meteorological station located a few kilometers from the still (figure 2), a straight line was found to pass through the majority of points, showing the expected trend in increased  $L$  with increased  $Q$ . Only one point, that of March, showed some deviation, due probably to the variability of weather conditions and the Khamsin dust storms during that month. In the same figure the straight line was replotted with the substitution of an efficiency ordinate for the water yield ordinate. The following points were revealed.

(a) The rate of production of water is very low compared with the aluminium foldable still. It is about 1.0 litre per square meter during the winter

period ( $Q = 350$  ly, per day), increases to about 3.5 litres during the summer period ( $Q = 600$ ), corresponding respectively to 18 and 35 per cent efficiency.

(b) The rate of production can be considered nil when  $Q$  falls to 250 ly per day.

Experimentation with this still for such a long period allowed us to put our finger on the technical difficulties causing the decrease in the water yield, which can be attributed to the following:

(a) The bad insulation underneath the base of the still;

(b) The bad construction of the collecting trough. To avoid break or leakage this should not be fixed beside the walls but should be fabricated with them as a concrete part;

(c) The use of a long inclined glass pane. This will cause the condensed water to take a longer time to reach the trough, and consequently a rise in glass temperature and fall in the rate of condensation.

### Cost estimates

The above study was intended for the purpose of experimental research and consequently no cost estimates were undertaken. To allow for such estimates a new permanent base concrete still was erected

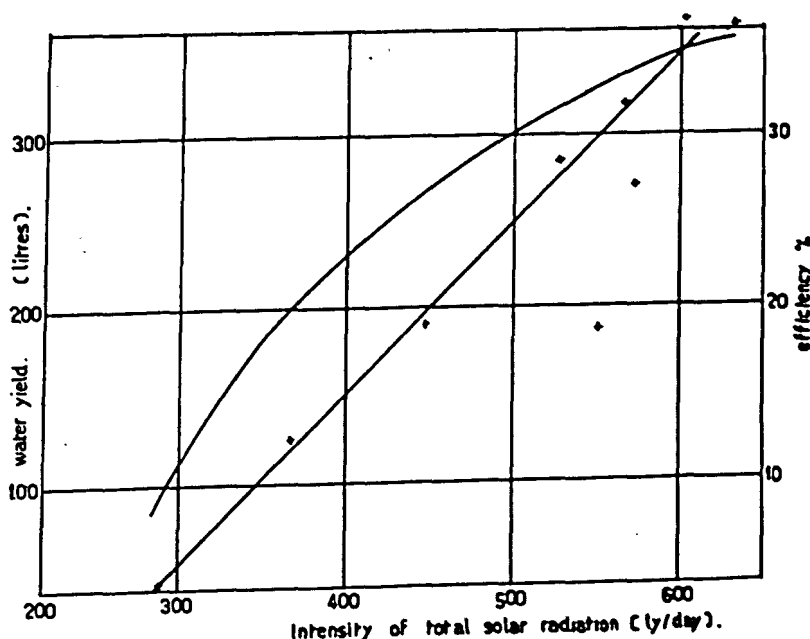


Figure 2

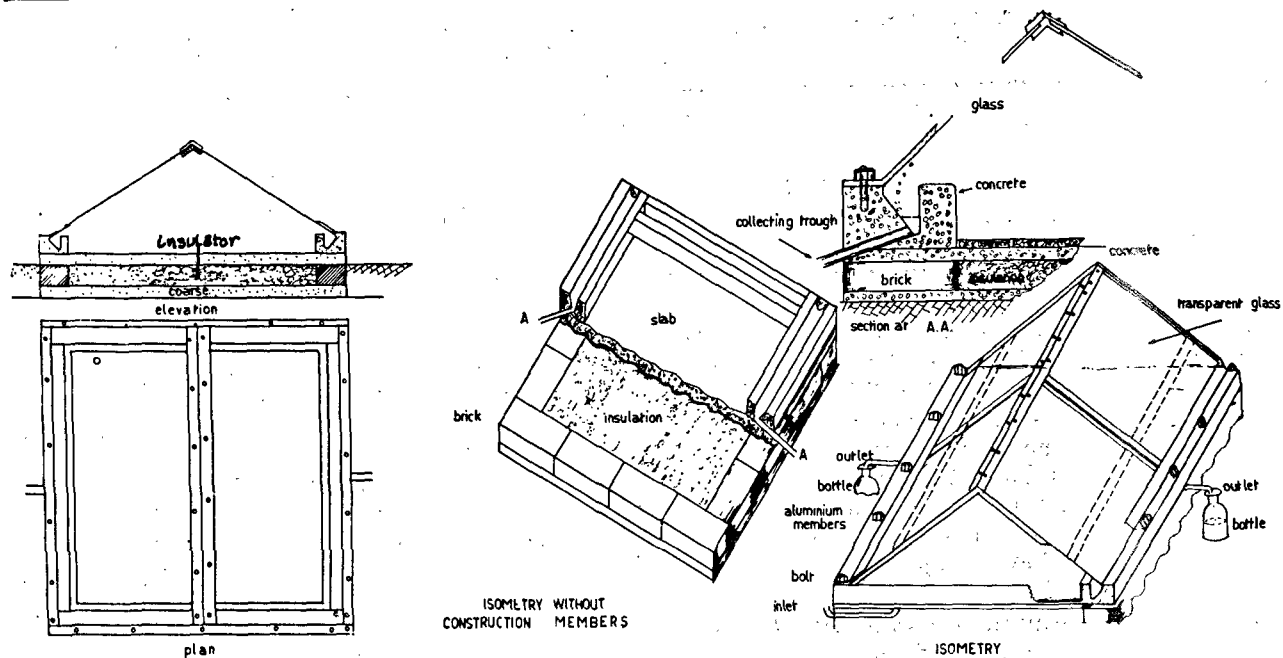


Figure 3

avoiding all the drawbacks described in the preceding paragraph. The constructional details are shown in figure 3. The still has an area of  $1.20 \text{ m}^2$  and is  $1.20 \text{ m}$  wide  $\times$   $1.00 \text{ m}$  long; these dimensions were chosen so that the still can be produced by factory methods, easily transported, assembled and fixed. It was found, from present-day local material and labour, that the capital investment is 5 pounds per square meter, whatever the size of the still. Obviously, there is no fuel cost, while for operation and maintenance, costs are very low, as solar stills are automatic in operation and only one labourer is needed for its cleaning. It is estimated that 2 or 3 per cent of the capital investment is required for a moderate size still producing from 50 000 to 100 000 gallons per day.

During March 1961, this still was compared with the aluminium foldable type and it was found that it

gives a greater yield, by 15 per cent, and that an estimation of  $5 \text{ litres/m}^2$  is considered acceptable as an average daily production for the whole year.

According to the above information, the construction of a non-profit and non-taxable plant, of an area  $200 \times 250 \text{ m}^2$ , will produce water for 0.35 pounds per 1 000 gallons of distillate and for about 0.25 pounds for blended water required for human and animal consumption. Estimates are based on 30 years' amortization of capital investment.

It should be noted that a concrete still represents the least and cheapest material requirements and that the only possibility of reducing investment costs may be through replacing the metallic framework and the glass cover by plastics supported on a simple wire frame.

### Summary

The development of the remote arid areas in Egypt requires the reduction of the salt content of the available underground water, which varies between 1 500 and 20 000 ppm. The conventional techniques of water conversion appear disadvantageous owing to the high cost of power and lack of skilled labour, while, on the other hand, solar energy seems promising owing to the high solar intensity and long sunshine duration, which amounts to 3 500 hours per year.

To increase the efficiency of solar distillation, the following preliminary experiments have been undertaken,

(a) A thin layer of brine was exposed to solar radiation. This was done by covering the waterproofed base of the still with a stretched cloth kept continuously wet by immersing its two ends in a reservoir containing the brine or by spraying the brine with a tubing with holes drilled in it.

(b) The saline water was preheated by solar energy in a reservoir beside the still, so as to reduce the time required to reach the distillation temperature and to increase the effective length of the distilling day.

These two experiments gave valuable information on details concerning construction, operation and maintenance of the stills. They were abandoned



because the increase in the yield was small, thus not justifying the high maintenance and investment costs.

(c) As wood and rubber are not practical in hot countries, an aluminium foldable still of the roof type was constructed. It was provided with a small reservoir which permits a constant level of water. The results obtained were encouraging, reaching more than 42 per cent.

A moderate-size experimental distiller was also constructed. It has a permanent concrete base of 40 m<sup>2</sup> area and a glass cover of the roof type. The results obtained on practically every day during the period of 10 months showed that the daily water yield increases with the increase of the solar intensity.

It has a maximum value slightly higher than 3.5 l. per m<sup>2</sup> of the effective area of the pan, corresponding to an efficiency of 35 per cent. The operation of this still for such a long period revealed many technical difficulties which could be obviated in the construction of big distilling plants.

To allow for cost estimates, a new model concrete still was erected, avoiding all the drawbacks which had been discovered, and such that its components can be produced by factory methods, easily transported, assembled and fixed. The estimated cost of distilled water was found to be 0.35 pounds per 1 000 gallons on the assumption that the plant is nonprofit and nontaxable, that its capital investment is to be amortized in 30 years and that its operation costs are 3 per cent of the investment.

## DÉMINÉRALISATION DES EAUX SAUMÂTRES PAR LE RAYONNEMENT SOLAIRE DANS LA RÉPUBLIQUE ARABE UNIE

### Résumé

La mise en valeur des régions éloignées et arides de l'Égypte exige la réduction de la teneur en sel des eaux souterraines disponibles, teneur qui varie entre 1 500 et 20 000 ppm. Les techniques classiques de conversion de l'eau semblent désavantageuses en raison du coût élevé de l'énergie et du manque de personnel spécialisé, tandis que l'énergie solaire, au contraire, semble beaucoup promettre, étant donné la forte intensité du soleil et la durée d'insolation qui atteint 3 500 heures par an.

Pour augmenter le rendement de la distillation solaire, on a entrepris les expériences préliminaires suivantes :

a) On expose une mince couche de saumure au rayonnement solaire. Ceci a été fait en couvrant la base imperméabilisée de l'alambic avec un morceau d'étoffe tendue, que l'on tient constamment humide en immergeant les deux extrémités dans le réservoir qui contient la saumure ou en pulvérisant celle-ci par un tube dans lequel sont perforés de petits orifices;

b) On réchauffe la saumure au moyen de l'énergie solaire dans un réservoir situé à côté de l'alambic, de manière à réduire le temps nécessaire pour arriver à la température de distillation et à augmenter la durée utile de la journée de distillation;

Ces deux expériences ont fourni des renseignements utiles sur les détails ayant trait à la construction, à l'exploitation et à l'entretien des alambics solaires. Mais on a dû laisser ces méthodes de côté, car l'augmentation de rendement qu'ils autoriseraient était trop petite pour justifier les frais élevés d'entretien et de premier établissement;

c) Pour autant que l'emploi du bois et du caoutchouc n'est pas pratique dans les pays chauds, on a réalisé un alambic démontable en aluminium. Il est doté d'un petit réservoir qui permet de maintenir un niveau d'eau constant. Les rendements obtenus sont encourageants et atteignent plus de 42 p. 100.

On a réalisé également un distillateur expérimental de petites dimensions. Il a une base permanente en ciment armé de 40 m<sup>2</sup> de surface et une couverture en verre du genre employé pour les toitures. Les résultats obtenus presque chaque jour sur une période de dix mois ont démontré que le rendement quotidien en eau augmente avec l'intensité du soleil. Il a une valeur maxima légèrement supérieure à 3,5 litres par m<sup>2</sup> de surface utile du collecteur, ce qui correspond à un rendement de 35 p. 100. L'exploitation de cet alambic pendant une aussi longue période a mis en lumière plusieurs difficultés techniques qu'il a été possible d'éviter dans la construction des gros alambics.

Pour tenir compte des évaluations de prix, on a mis au point un nouvel alambic en ciment armé, réalisé en évitant tous les inconvénients déjà découverts, conçu de telle sorte que ses éléments puissent être fabriqués par des techniques d'usine, et soient faciles à transporter, à monter et à fixer. Les frais approximatifs d'eau distillée se sont établis à 0,35 livre égyptienne par 1 000 gallons, en admettant que l'installation ne réalise pas de bénéfices, ne soit pas sujette au fisc, que ses frais de premier établissement soient amortis en trente ans et que ses frais d'exploitation représentent 3 p. 100 de la somme investie.

## ÉVAPORATEURS ET DISTILLATEURS SOLAIRES AU CHILI

Julio Hirschmann R.\*

### Considérations géographiques

Désolé, riche en sel, enclavé entre la Cordillère des Andes et l'Océan Pacifique, le désert septentrional du Chili, dont la surface atteint 200 000 km<sup>2</sup>, s'étend en latitude de 17°30' S à 27°20' S. Il englobe les provinces de Tarapacá et Antofagasta et le département de Chañaral (1). Cette région aride représente plus du quart de l'étendue du territoire total du pays, laquelle est de 742 000 km<sup>2</sup> (2).

Géographiquement parlant, la région en cause se caractérise par un relief dominé par un jeu de paliers plats, où règnent les conditions désertiques les plus extrêmes. On trouve un large plateau dans sa partie méridionale, lequel s'étend de la côte à la frontière argentine et au-delà. Il est connu sous le nom de Puna de Atacama et limité par le massif du Salado (3). Cette région des Andes se caractérise par son abondance de volcans et sa largeur considérable, puisque son ampleur augmente jusqu'à ce qu'elle forme le haut plateau bolivien.

Nous nous en tiendrons, dans le présent mémoire, à la province d'Antofagasta et plus spécialement à la région qu'indique la carte de la figure 1, c'est-à-dire à la zone comprise entre les vingt et unième et vingt-quatrième parallèles et les soixante-septième et soixante et onzième méridiens.

Le désert d'Atacama s'étend vers le sud, à partir d'un fleuve, le Loa. Il comporte de grandes dépressions, dont le diamètre atteint plusieurs kilomètres, au fond desquelles on trouve d'énormes quantités de sel en provenance de lacs appartenant à une ère géologique disparue, qui donnent leur origine à de nombreuses salines, dont la plus grande est celle qui porte le nom de Salar de Atacama.

L'hydrographie, à la seule exception du Loa et de ses affluents, est constituée par de petits ruisseaux qui, encaissés au fond d'étroites vallées, ne parviennent pas à la mer, étant absorbés par les terrains perméables qu'ils traversent. Le Loa, qui est le plus long des fleuves chiliens, trouve sa source sur les pentes du volcan Miño, par 21°12' de latitude sud et 18°54' de longitude ouest, descend vers le sud jusqu'à Chiu-Chiu, s'oriente ensuite à l'ouest sur Chacance, puis décrit une vaste courbe pour aller se jeter dans le Pacifique au bout d'un cours de 440 km. Ce n'est que dans la partie supérieure de ce cours qu'il a des affluents tels que le San Pedro, le Salado et le San Salvador. Le bassin hydrographique

du Loa représente 33 910 km<sup>2</sup> mais, malgré cette surface relativement considérable, il ne débite que 2 000 litres à la seconde. Ses eaux sont alimentées par la fonte des neiges des sommets élevés de la Cordillère, et ce n'est que près de la source qu'elles sont douces, car elles deviennent de plus en plus saumâtres au fur et à mesure qu'il descend dans le désert. A la hauteur de l'installation nitratière María Elena, la teneur de ces mêmes eaux en sels dissous est de 4 661 ppm, avec prédominance du chlorure de sodium.

Le climat de cette région, qui constitue un désert au sens absolu du mot, se caractérise par le manque de pluie et, vers l'intérieur, par la sécheresse de l'air et les écarts de température. Ce n'est qu'en bord de mer qu'apparaissent quelques brouillards du matin (nom régional : « camanchaca ») qui se dissipent dès que l'on franchit les hauteurs côtières. Les températures moyennes les plus fréquemment observées varient entre 17,8 °C, pour la saison d'été, et 11,1 °C pour celle de l'hiver, tandis que les pluies, très rares pour autant qu'il n'y a que de modestes précipitations en juillet et en octobre, ne dépassent pas un total de 1,4 mm par an.

La flore et la faune sont limitées par les conditions propres au milieu qui vient d'être décrit, si bien que l'humidité des gorges et des versants de la Cordillère n'autorise que l'existence de quelques espèces botaniques, telles que le « tamarugo », qui a presque disparu, et la « llareta » qui fournit le seul combustible industriel de la région, outre une faune plus restreinte encore.

Malgré la grande aridité du désert d'Atacama, sa croûte calcinée et rugueuse recouvre un véritable laboratoire pétrifié, et ses gisements de cuivre, de fer, de soufre, de borax et d'uranium, ainsi que ses gîtes d'une ample variété de sels mixtes, parmi lesquels se détache le nitrate de potasse, représentent l'une des richesses extraordinaires du pays. Il n'y a donc rien de surprenant à ce que cette région, géographiquement si peu hospitalière, ait vu naître de grandes industries liées à l'exploitation de ses minéraux, parmi lesquelles se détachent les installations de Chuquicamata, entourées d'une ville de 24 000 habitants, et celles de María Elena, Coya Sur et Pedro de Valdivia, dont la dernière compte 28 000 habitants. C'est autour de ces industries que se développa le port d'Antofagasta, ville la plus importante du Chili septentrional, métropole moderne et active, qui offre tous les avantages d'installations portuaires complètes, avec un magnifique aéroport international.

\* Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaiso, Chili.

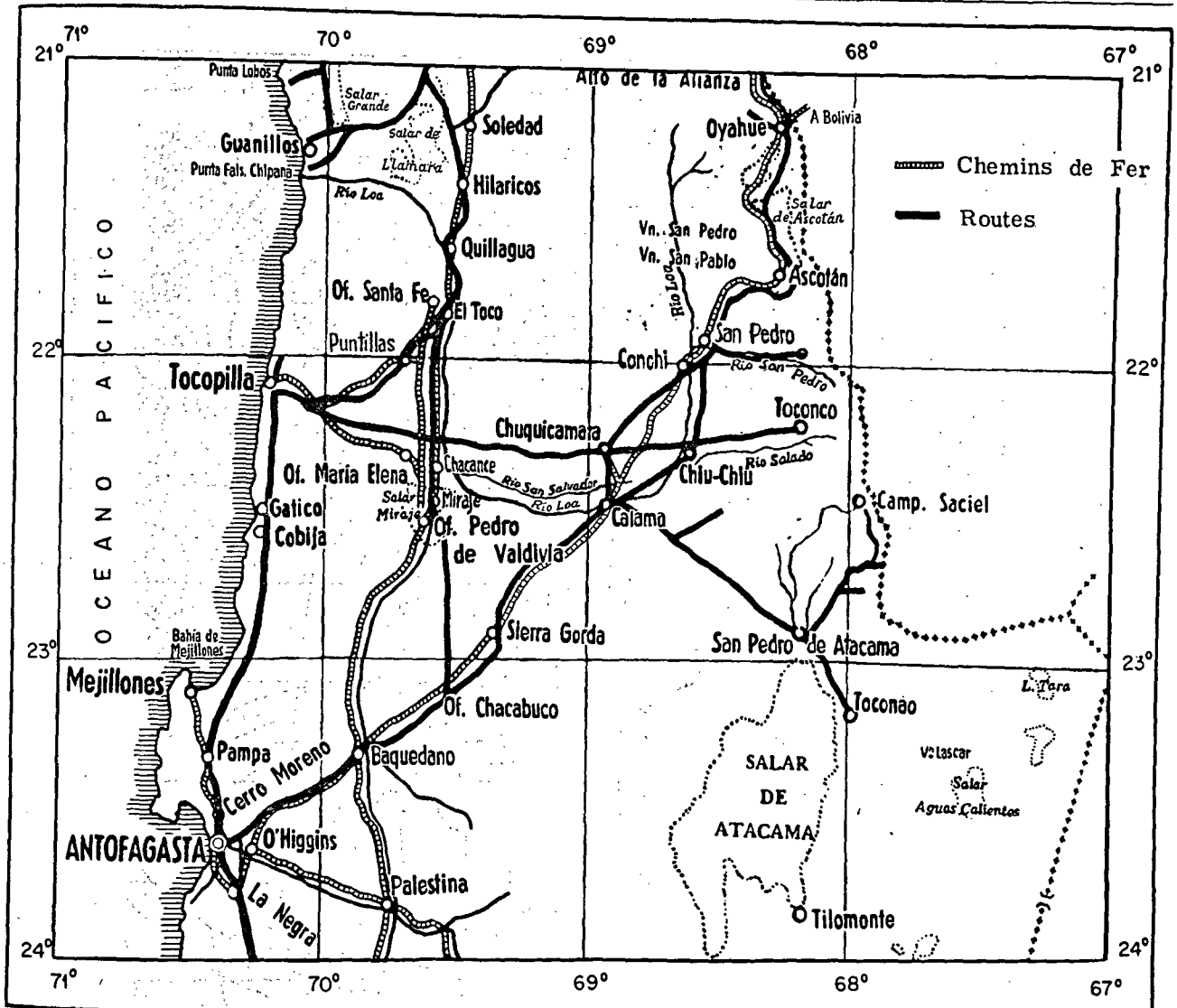


Figure 1. Carte du désert d'Atacama, dans le nord du Chili

Malgré tout cela, sa population de 80 000 habitants a toujours dû lutter pour se procurer quelque chose de plus essentiel encore : l'eau potable. Ce ne fut qu'en 1958 que se termina la pose d'une nouvelle conduite principale d'amenée d'eau longue de 307 km, partant de Toconce, à une altitude de 3 600 m, pour aller déboucher finalement dans les étangs d'Antofagasta.

### Considérations solarimétriques

On sait que le désert d'Atacama constitue l'une des meilleures régions du globe pour l'utilisation de l'énergie solaire. Suivant les indications de la carte publiée par le département des services climatologiques du bureau météorologique des États-Unis d'Amérique du Nord (4), dont on reproduit à la figure 2 la partie qui correspond aux Amériques, le nombre total des heures d'ensoleillement y atteint

une moyenne de 4 000 heures, chiffre extrêmement voisin du maximum théorique de 4 383 heures. Il faut ajouter à ceci que, compte tenu de la nature collante du sol salin de cette région, le rayonnement solaire n'y est intercepté que dans une très faible mesure par les tempêtes de poussière si fréquentes dans d'autres déserts.

Bien que cette situation favorable ait été connue de longue date, on ne dispose pas encore de mesures solarimétriques systématiques pour la province d'Antofagasta. On a seulement procédé à quelques mesures individuelles, au sujet desquelles nous présentons ici quelques notes sommaires.

Au lieu dit Montezuma, près de la ville de Calama, la Smithsonian Institution, dont le siège est aux États-Unis, à Washington, a procédé pendant plusieurs années à des mesures du rayonnement solaire. Malheureusement, cet observatoire fut démonté en 1948 parce que, lorsque l'usine de sulfure de

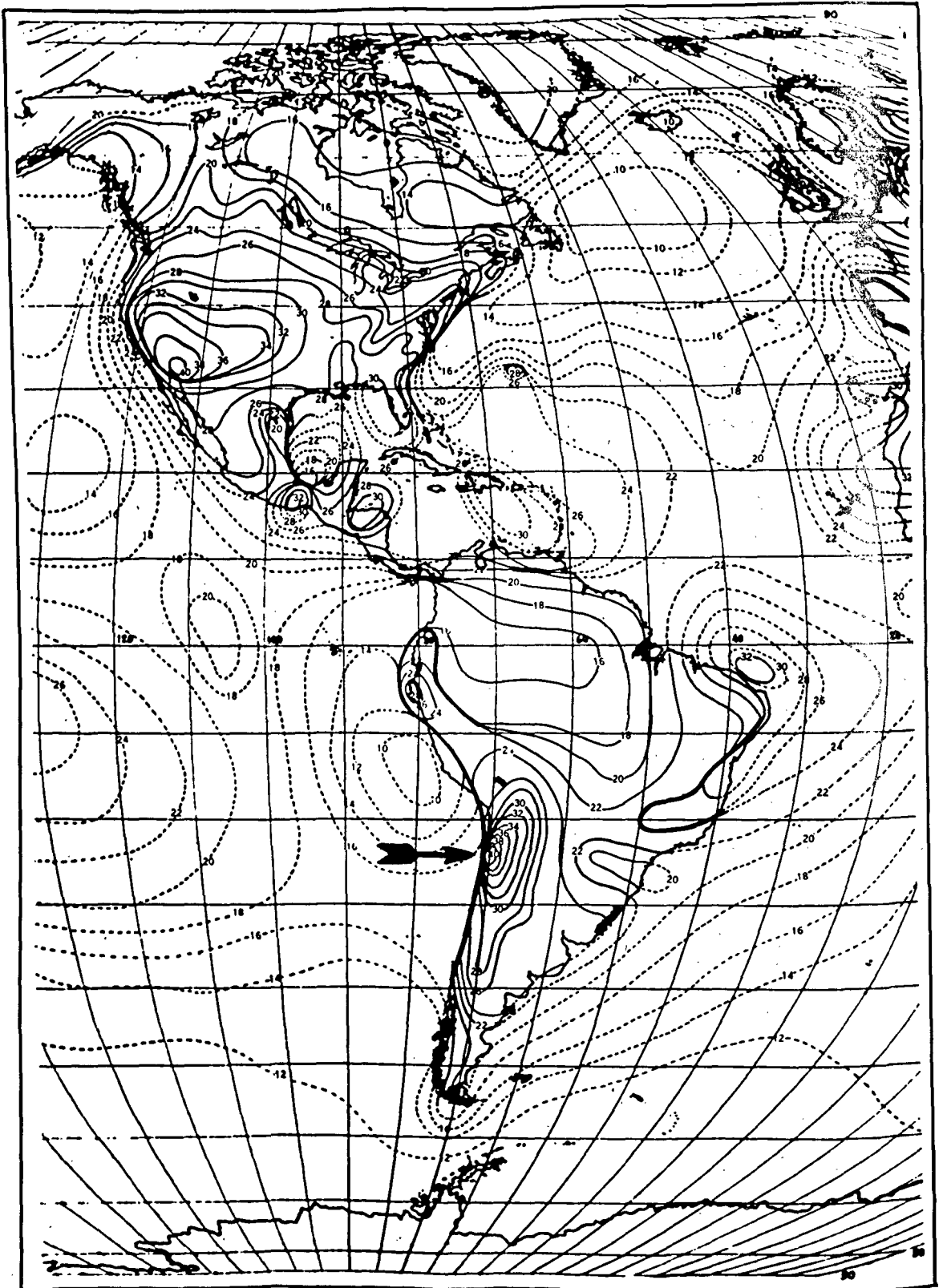


Figure 2. Carte des Amériques, indiquant les courbes d'iso-rayonnement solaire, en unités de 100 heures hebdomadaires

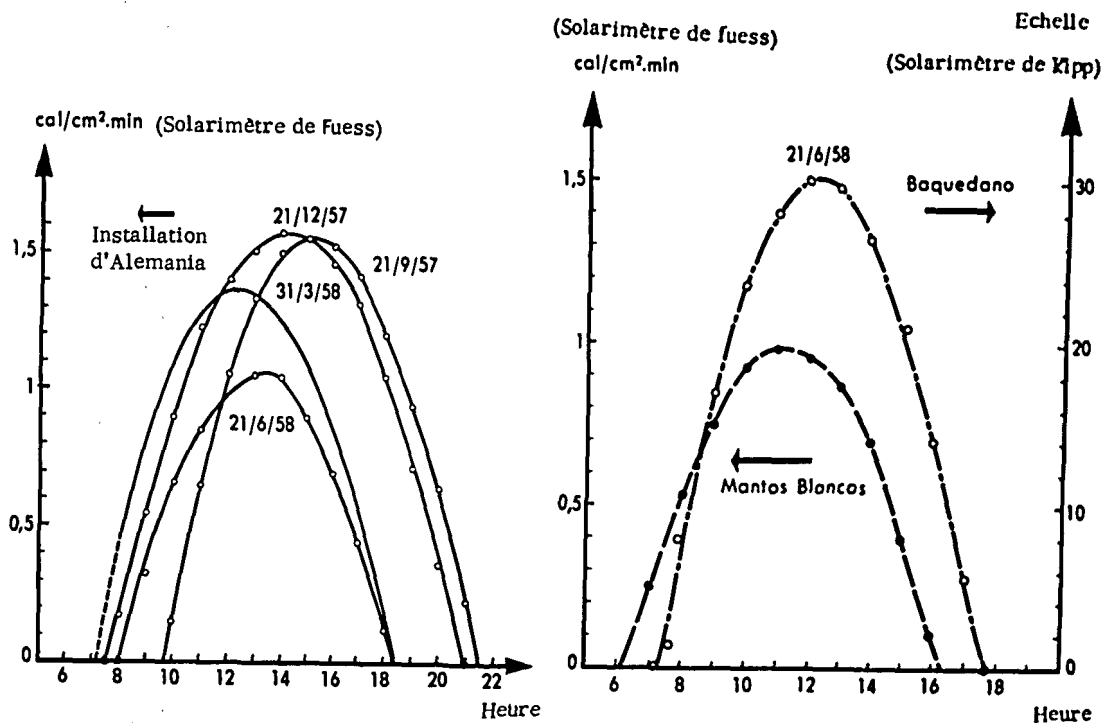


Figure 3. Courbes solarimétriques établies par Desvignes et Frick en trois points différents du désert d'Atacama

cuivre de Chuquicamata, très voisine de Calama, commença ses travaux, la quantité de poussière en suspension dans l'atmosphère augmenta de façon très sensible.

Depuis septembre 1957, le Service de la recherche scientifique appliquée (abréviation espagnole DICA) affilié au Centre Universitaire de la Zone Nord de l'Université du Chili, procède à des mesures du rayonnement solaire en divers lieux de la province d'Antofagasta. François Desvignes et Germain Frick ont publié les premiers résultats de ces mesures (5), dont nous tirons le graphique de la figure 3, qui indique les courbes solarimétriques obtenues pour trois points différents du désert d'Atacama.

Le tableau 1, tiré de la même publication, indique l'enneuagement au lieu dit Oficina Alemania, situé à 160 km au sud d'Antofagasta et à 20 km de la côte, exprimé en pourcentages de perte diurne de l'énergie solaire incidente. Ainsi qu'on pourra l'observer, l'enneuagement a été extrêmement faible pour la période passée en revue, s'établissant à une moyenne annuelle de 3,1 p. 100 de pertes seulement.

En se basant sur les mesures faites par Desvignes et Frick, Victor Bocič a établi, pour Antofagasta, les courbes mensuelles moyennes d'énergie solaire incidente pendant une journée sans nuages pour chacun des mois indiqués (6). Ces courbes sont reprises à la figure 4.

Le Centre de recherches sur les applications de l'énergie solaire (CIESA) de l'Université du Nord, affiliée à l'Université Catholique de Valparaiso, et

le Laboratoire d'énergie solaire de l'Université technique Federico Santa María sont actuellement en train de procéder à l'installation de solarigraphes Fuess en divers points du désert d'Atacama, et on compte disposer avant peu de données solarimétriques plus complètes qu'il n'a été possible d'en recueillir jusqu'à présent.

### Considérations historiques

C'est la nature elle-même qui a enseigné à l'homme le procédé de l'évaporation solaire pour extraire les sels de ses solutions aqueuses. Le nombre incalculable de marais salants, aux dimensions parfois extraordinaires, que l'on trouve tout le long de la côte occidentale de l'Amérique du Sud en est le témoin, et on est en droit de supposer qu'ils ont amené l'homme primitif de ces régions à se procurer du sel, produit apprécié de longue date, par l'évaporation de l'eau de mer. En divers lieux de la côte du Pérou, dont les noms sont encore indiens, on trouve la racine « cachi », qui signifie « sel » en langue quichua; mais, malgré l'aimable collaboration qu'a bien voulu nous prêter le Professeur Hans Horkheimer, à qui nous devons l'observation étymologique citée plus haut, il n'a pas été possible, jusqu'à présent, d'établir des faits démontrant de façon probante l'existence de surfaces d'évaporation solaire à l'époque pré-hispanique. Pour l'ère qui suit la conquête, en revanche, nous disposons du témoignage d'une grande autorité, en la personne d'Alexandre

Tableau 1. Ennuagement à la station Alemania, d'après Desvignes et Frick. Pertes journalières d'énergie, en pourcentage

Année	1957					1958						
	Date	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet
1. . . . .	—	10	0	10	5	0	20	0	0	10	5	0
2. . . . .	—	10	0	5	10	5	15	0	0	15	5	0
3. . . . .	—	10	0	0	10	0	0	0	10	0	5	0
4. . . . .	—	0	0	0	10	0	0	0	5	0	0	—
5. . . . .	10	10	0	0	10	0	0	0	0	0	0	—
6. . . . .	10	5	0	0	0	0	0	0	5	0	0	—
7. . . . .	0	30	0	0	0	0	10	0	5	0	5	—
8. . . . .	0	70	0	0	0	0	15	0	5	0	10	—
9. . . . .	10	40	0	0	0	0	0	20	0	0	0	—
10. . . . .	5	0	0	0	0	0	—	0	0	10	0	—
11. . . . .	0	0	0	0	0	5	—	0	0	25	0	—
12. . . . .	0	0	0	0	5	10	—	0	0	10	20	—
13. . . . .	0	0	0	0	5	0	—	0	0	0	15	—
14. . . . .	0	0	0	0	0	0	—	5	0	0	—	—
15. . . . .	0	5	0	0	0	0	—	0	0	0	—	—
16. . . . .	0	5	20	0	0	0	—	0	5	0	—	—
17. . . . .	0	5	30	0	0	5	—	0	5	5	—	—
18. . . . .	0	10	0	0	0	15	—	5	5	0	—	—
19. . . . .	0	0	5	0	10	0	—	15	0	0	—	—
20. . . . .	0	0	10	0	10	0	—	0	5	0	—	—
21. . . . .	0	0	0	0	10	10	—	0	20	0	0	—
22. . . . .	0	0	5	0	10	0	—	0	0	0	0	—
23. . . . .	0	0	10	5	0	5	—	0	0	0	0	—
24. . . . .	0	0	0	0	0	0	—	0	0	10	0	—
25. . . . .	0	0	0	0	0	0	—	0	5	0	0	—
26. . . . .	0	5	0	0	0	0	—	0	5	0	15	—
27. . . . .	0	0	0	0	0	5	—	0	0	5	0	—
28. . . . .	0	0	20	5	0	10	0	0	25	5	0	—
29. . . . .	0	0	15	0	0	0	5	0	0	5	0	—
30. . . . .	0	0	0	0	0	0	0	—	0	5	0	—
31. . . . .		0		5	0	0	0		0		0	—

de Humboldt qui, au cours de l'un de ses voyages, passa à Las Salinas, près de Huacho, au nord de Lima (7), où il vit les bassins permettant de procéder sur une échelle industrielle à l'extraction du sel de l'eau de mer par l'évaporation solaire. On est en droit de se rallier au point de vue suivant lequel les Espagnols ont également apporté cette méthode au Chili.

Il se trouve, par une curieuse coïncidence, que la dénomination « Las Salinas » (Les Salines) est également celle du lieu où se trouvait la première installation de distillation solaire industrielle dont on ait connaissance. C'est en cet endroit même, mieux connu aujourd'hui sous le nom d'installation de Chacabuco, sur la ligne du chemin de fer qui relie Antofagasta à la Bolivie, que l'Américain Charles Wilson, dès 1874, avait conçu et réalisé un collecteur de chaleur solaire dont il faisait usage pour distiller l'eau saumâtre en provenance du sous-sol. C'est en son voisinage, à l'installation dite Domeyko, qu'un distillateur solaire analogue fonctionna avec succès pendant quelque temps (9).

L'installation dite « Las Salinas » avait une surface globale de 4 757 m<sup>2</sup> et produisait 22,5 m<sup>3</sup> d'eau distillée par jour (10), laquelle était très recherchée par les entreprises minières et les commerçants de toute la région. Elle fonctionna de façon continue pendant plus de 40 ans et ne fut abandonnée qu'après l'achè-

vement de la première conduite qui amena l'eau potable des Andes à Antofagasta. Il y a cinq ans, Maria Telkes publiait une photographie du distillateur (11), prise en 1908 et reproduite à la figure 5. Il ne reste actuellement que quelques fossés et une abondance de petits morceaux de verre pour rappeler le site de la première installation de distillation solaire qui ait reçu des utilisations industrielles. La figure 6 est une reproduction d'une photographie prise tout récemment au même endroit, à l'occasion d'une visite du Professeur John Duffie, de l'Université du Wisconsin. Elle a été prise dans la même direction que celle, plus ancienne, que l'on voit à la figure antérieure.

### Évaporateurs solaires de la compagnie nitrière Anglo-Lautaro, Coya Méridional

En 1948, à moins de cent kilomètres au nord de Las Salinas (installation Chacabuco), la compagnie de nitrates Anglo-Lautaro commença la réalisation d'une installation d'évaporation solaire, qui fut inaugurée en 1951 (voir figure 7). Elle comporte actuellement dix grands bassins faits d'un ciment armé spécial mis au point par la compagnie et constitué par un mélange à 1 : 2,5 : 3 de chaux, de graviers (déchets de la lixiviation du nitrate naturel)

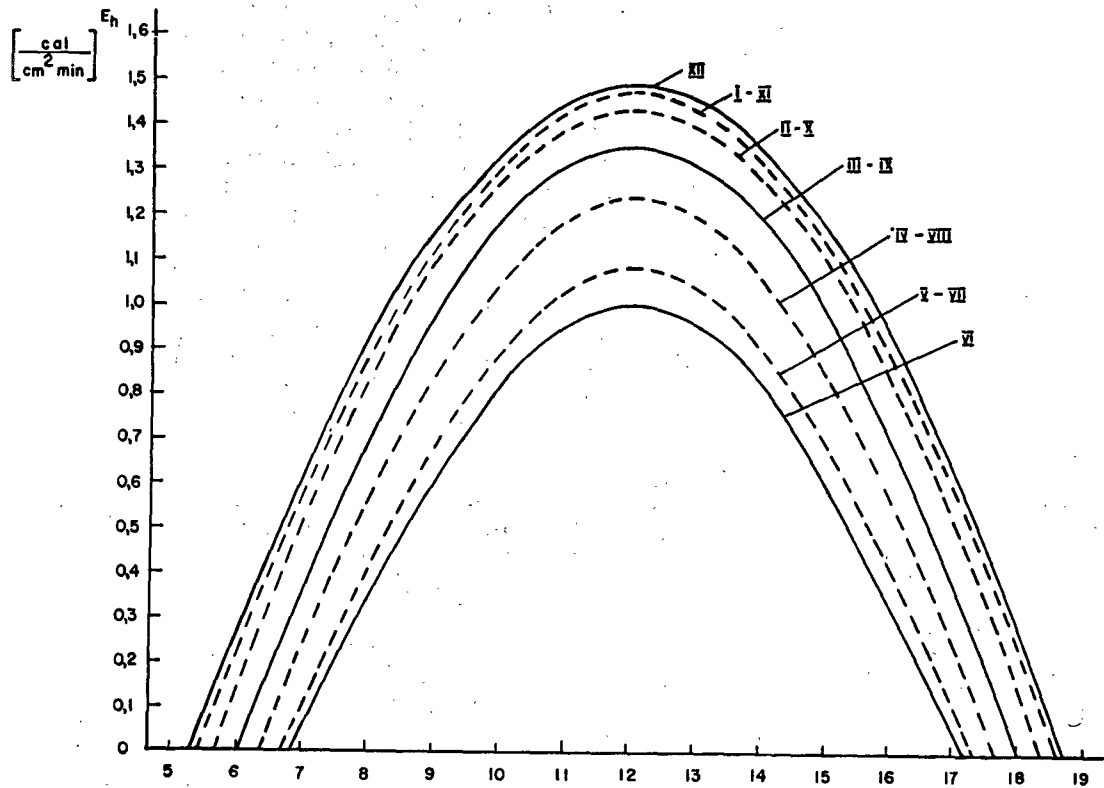


Figure 4. Courbes mensuelles donnant la moyenne de l'énergie solaire incidente pendant un jour sans nuages sur l'ensemble du mois indiqué. Établies à Antofagasta par Victor Bocic

et de pierre broyée. Chacun de ces bassins d'évaporation solaire présente une surface de 44 000 m<sup>2</sup> et assure l'évaporation de 236 m<sup>3</sup> d'eau par jour, ce qui correspond à une capacité moyenne de 5,34 dm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> par jour.

L'économie de pétrole qu'autorise ce procédé d'évaporation se chiffre, d'après des données aimablement communiquées par la compagnie, à quelque 158 tonnes par jour. Si on se rappelle que tout combustible à consommer dans cette région doit être

amené de très loin, on est en droit d'estimer que ces dix évaporateurs solaires représentent un gros succès. Mais il ne faut pas oublier que, du point de vue thermodynamique, leur rendement est très faible, pour autant que la totalité de la chaleur latente de vaporisation est gaspillée en pure perte.

En intégrant au planimètre sous les courbes d'énergie solaire incidente, telles qu'elles ressortent de la figure 4, tracées par Victor Bocic, nous avons obtenu les valeurs de l'énergie solaire  $E_i$  disponible en théorie

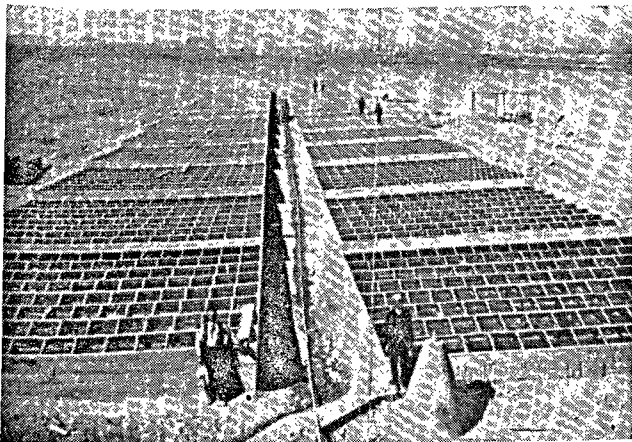


Figure 5. Photographie du distillateur solaire « Las Salinas », prise en 1908 et publiée par María Telkes



Figure 6. Photographie prise à la fin de 1960 de l'emplacement qu'occupait le distillateur solaire de « Las Salinas »

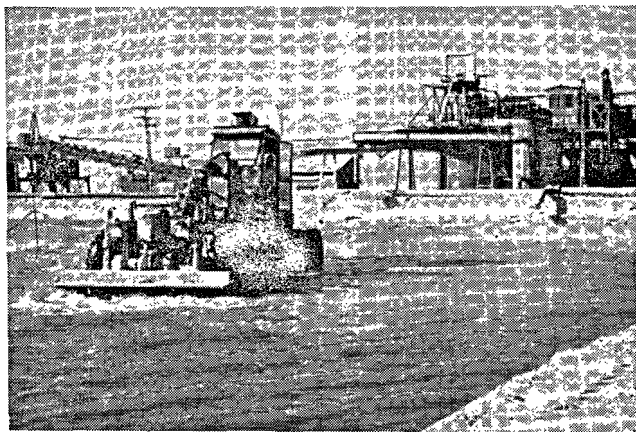


Figure 7. Bassin d'évaporation solaire dans le Coya méridional. On voit « l'éléphant », machine spéciale mise au point par la compagnie Anglo-Lautaro pour le travail avec les concentrés

pour un jour moyen du mois en cause. Ces valeurs sont portées au tableau 2. La deuxième partie de ce même tableau indique l'évaporation quotidienne pendant le mois choisi comme norme et mesurée par la compagnie, ainsi que sa chaleur équivalente de vaporisation  $H_v$ . Finalement, on a calculé le rendement, quotient obtenu en divisant cette chaleur par l'énergie solaire incidente théorique mesurée au bassin.

La figure 8 donne une représentation graphique de ces deux chaleurs. On observera facilement qu'il existe une dépendance marquée entre les variations mensuelles de la chaleur de vaporisation et l'énergie solaire incidente. Nous devons donc aboutir à la conclusion que la grande sécheresse de l'air dans cette région ne représente pas une influence directe et immédiate aussi prononcée que le supposaient certains auteurs. Ceci est encore confirmé par le fait que l'évaporation quotidienne moyenne au même

lieu, pour l'eau pure, a été déterminée comme étant inférieure de 20 p. 100 à celle de la solution de nitrates qui est colorée et normalement concentrée dans les bassins par l'évaporation solaire.

Les bassins d'évaporation du Coya Méridional représentent actuellement la seule utilisation industrielle importante de l'énergie solaire au Chili. Divers projets sont en cours dans le but de trouver d'autres formes d'application de cette énergie, et trois universités chiliennes, à savoir l'Université du Chili, l'Université du Nord (affiliée à l'Université Catholique de Valparaiso) et l'Université technique Federico Santa María, procèdent depuis quelques années à des recherches dans les divers domaines d'application de l'énergie solaire.

### Projet d'installation pilote destinée à transformer l'eau saumâtre en eau douce au moyen de l'énergie solaire et à produire en même temps de l'électricité

Voici plusieurs années que le service du génie civil de l'Université technique Federico Santa María travaille à divers projets de distillation de l'eau salée par l'énergie solaire, car le manque d'eau douce est un des problèmes les plus graves qui se posent pour la mise en œuvre des provinces septentrionales du Chili.

Sous la direction de l'auteur du présent mémoire, Victor Bocič a mis au point le projet d'une installation pilote qui utilisera l'énergie solaire pour la distillation d'eau saumâtre et produira en même temps de l'électricité. La figure 9 donne un schéma de cette centrale.

L'eau saumâtre, après avoir été portée à la température voulue dans le collecteur solaire 1, passe à l'accumulateur 2, où l'air est séparé du liquide. Cette eau saumâtre chauffée sort alors de l'accumulateur et pénètre dans le bouilleur à vide 3. Une partie

Tableau 2. Évaporation solaire dans le Coya méridional

Mois	Énergie solaire incidente moyenne par jour $E_t$ (kcal/m <sup>2</sup> /jour)	Évaporation quotidienne moyenne <sup>a</sup> (dm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /jour)	Chaleur moyenne quotidienne de vaporisation <sup>b</sup> (kcal/m <sup>2</sup> /jour)	Rendement $\eta = \frac{H_v}{E_t}$ [-]
I. . . . .	7620	7,00	4200	0,551
II . . . . .	7172	5,90	3540	0,494
III . . . . .	6328	5,86	3516	0,556
IV . . . . .	5452	4,54	2724	0,550
V . . . . .	4408	3,71	2226	0,505
VI . . . . .	3924	3,48	2088	0,532
VII . . . . .	4408	3,82	2292	0,520
VIII . . . . .	5452	3,94	2364	0,434
IX . . . . .	6328	5,44	3264	0,516
X . . . . .	7172	6,29	3774	0,526
XI . . . . .	7620	6,23	3738	0,491
XII . . . . .	7920	7,91	4746	0,599
Moyenne annuelle . . . . .	6150	5,34 <sup>c</sup>	3204	0,52

<sup>a</sup> De juillet 1959 à juin 1960.

<sup>b</sup> Avec une chaleur latente de vaporisation de 600 kcal/kg.

<sup>c</sup> Une valeur moyenne ne dépassant pas 4,28 dm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/jour a été déterminée pour l'eau pure.



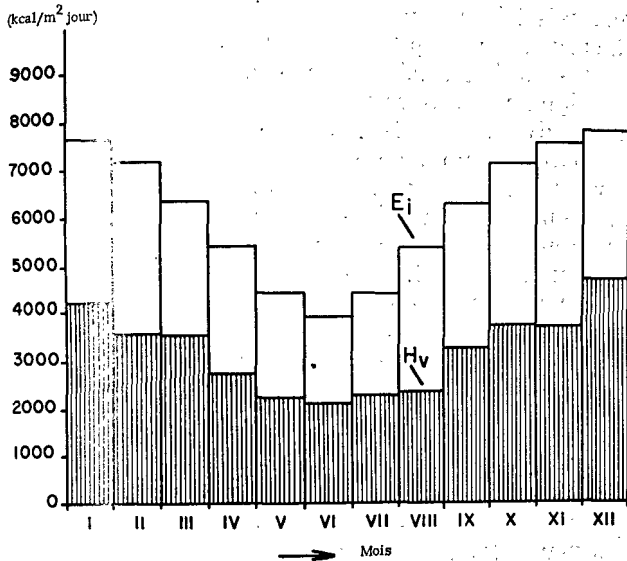


Figure 8 Énergie solaire incidente  $E_i$  et chaleur de vaporisation  $H_v$  mesurées aux bassins d'évaporation solaire du Coya méridional

de l'eau se vaporise dans cette chaudière, où une pompe pneumatique maintient une faible pression, 10, empruntant la chaleur voulue au reste de la masse d'eau. La vapeur et l'eau sortent du bouilleur à la même température. La vapeur passe à la turbine 4, dans laquelle une partie de son énergie thermique est transformée en énergie mécanique pour être finalement livrée à la consommation sous forme d'énergie électrique par l'entremise du train réducteur 5 et de la dynamo 6.

La vapeur qui sort de la turbine se condense dans le condenseur 7 et sort de l'installation sous forme d'eau distillée. La chaleur de condensation est partiellement utilisée pour le réchauffage de l'eau saumâtre qui entre dans le collecteur d'énergie solaire après son passage à l'échangeur de chaleur 8. Dans cet échangeur, le concentré qui vient du bouilleur livre une partie de sa chaleur à l'eau saumâtre moins concentrée en provenance du fleuve ou de toute autre source, 12, après son passage par le condenseur.

Les pompes 9 assurent une circulation continue de l'eau saumâtre, du concentré et de l'eau distillée.

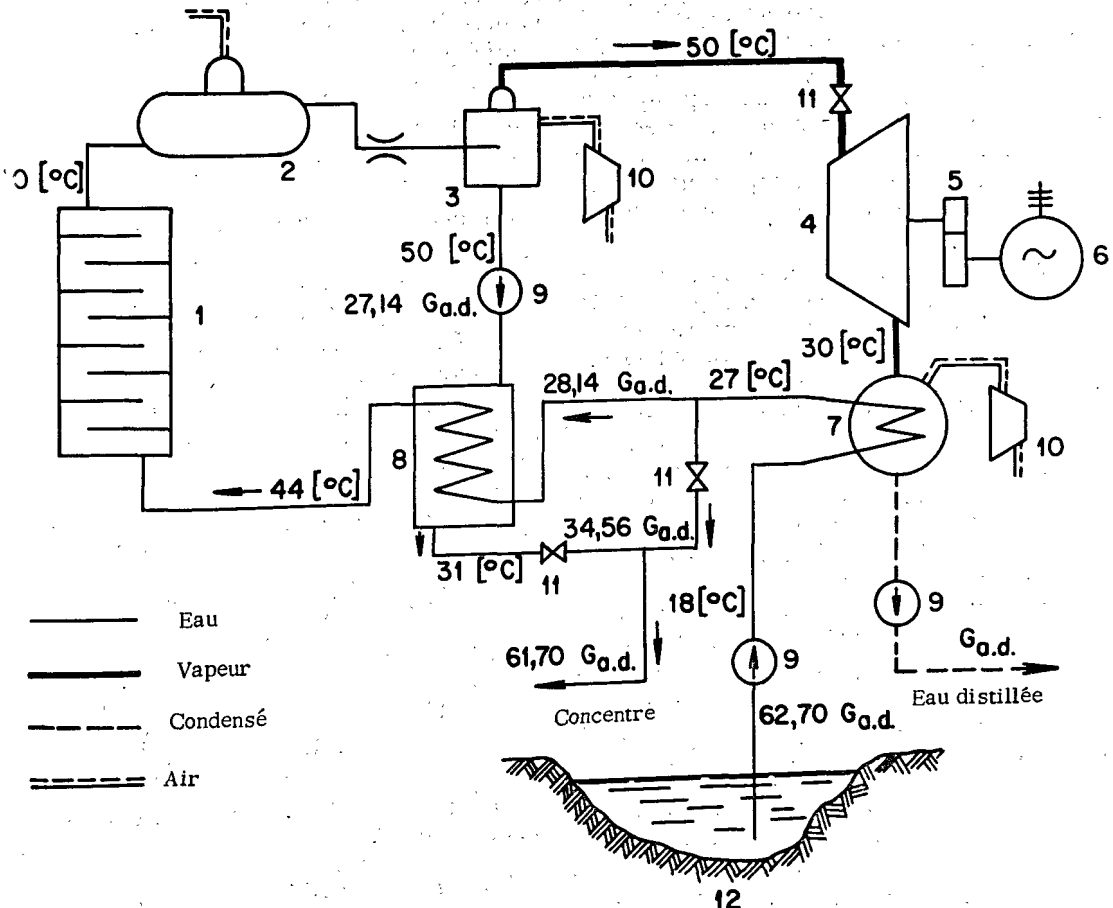


Figure 9. Schéma d'une installation pilote qui utilise l'énergie solaire pour distiller de l'eau saumâtre et produire en même temps de l'énergie électrique

- |                                    |                                  |
|------------------------------------|----------------------------------|
| 1) Collecteur d'énergie solaire    | 7) Condenseur                    |
| 2) Accumulateur                    | 8) Échangeur de chaleur          |
| 3) Bouilleur à dépression (à vide) | 9) Pompes de circulation         |
| 4) Turbine à vapeur                | 10) Pompes pneumatiques (à vide) |
| 5) Train réducteur                 | 11) Vannes de réglage            |
| 6) Alternateur                     | 12) Fleuve ou puits              |

Les vannes 11 servent à régler la quantité de vapeur produite et le volume de concentré à éliminer, la dépression voulue étant maintenue dans le condenseur par une seconde pompe pneumatique.

Victor Bocič (12) a procédé au calcul des conditions thermodynamiques et économiques idéales pour l'exploitation d'une centrale débitant 50 kW de puissance électrique utile, en admettant que la température d'admission de l'eau saumâtre soit de 18 °C et qu'elle soit portée à 70 °C dans le collecteur solaire. Dans ces conditions, la centrale fournirait en moyenne 9,5 m<sup>3</sup> d'eau distillée par jour. En pareil cas, le rapport entre la vapeur ainsi produite et le volume d'eau saumâtre chauffée serait de 36 kg par mètre cube d'eau arrivant au collecteur solaire. Ceci revient à dire que chaque mètre cube d'eau saumâtre admis dans le collecteur produit 36 litres d'eau distillée.

L'eau saumâtre entre dans le condenseur à une température moyenne de 18 °C et en sort à 27 °C. La proportion de l'eau utilisée à refroidir le condenseur qui est ensuite acheminée vers l'échangeur de chaleur ne dépasse pas 45 p. 100. Le reste, soit 55 p. 100, est purement et simplement rejeté. La température de l'eau saumâtre qui reste en circuit, dans l'échangeur, monte à 44 °C et, dans le collecteur solaire, elle arrive enfin à 70 °C. La vapeur et le concentré sortent du bouilleur à une température de 50 °C et la température de ce concentré tombe à 31 °C dans l'échangeur. La température de la vapeur en condensation dans le bouilleur est maintenue à 30 °C.

Dans les conditions indiquées ci-dessus, le collecteur solaire prévu du type plan, incliné à 23,5°, constitué par des tubes de cuivre ayant 19 mm de diamètre, présente une surface totale de 4 280 m<sup>2</sup>, laquelle correspond à une aire spécifique de 450 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> par jour d'eau distillée. Le bouilleur a une section intérieure de 1,88 m<sup>2</sup>, ou 0,198 m<sup>2</sup> de surface spécifique par mètre carré et par mètre cube par jour. Les valeurs correspondantes pour le condenseur et l'échangeur de chaleur sont une surface de 85,3 m<sup>2</sup> avec une différence de température moyenne de 6,5° au condenseur et 318 m<sup>2</sup> et 4,24° pour l'échangeur de chaleur. Les surfaces spécifiques s'établissent à 8,97 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>/jour et 33,5 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>/jour respectivement.

Les puissances à fournir pour maintenir l'installation en fonctionnement dans des conditions normales d'exploitation sont 1,65 kW et 1,45 kW pour deux pompes de circulation en fonctionnement continu, et 2,8 kW pour une pompe auxiliaire. Le schéma de la figure 9, dans le but de simplifier l'illustration, n'indique qu'une seule pompe de circulation. Celle qui sert à l'extraction du produit de condensation ne consomme que 0,18 kW. Des deux pompes pneumatiques, celle qui est destinée au condenseur a une puissance de 1,15 kW et l'autre, qui doit maintenir la dépression voulue dans le bouilleur, consomme 0,68 kW.

Peu après la publication des premiers renseignements (13) sur le projet de cette installation pilote destinée au désert d'Atacama, un article de

Asa Snyder (14) paraissait dans la revue « Solar Energy », dans lequel il décrivait une autre centrale de distillation solaire pour l'eau de mer, dont le fonctionnement devait reposer sur le même cycle thermodynamique. Bien qu'il ne s'agisse pas d'une installation pilote dans le projet soumis par Asa Snyder, mais bien d'une centrale industrielle de beaucoup plus grande envergure, son principe de fonctionnement est le même. Après nous être mis en rapport avec M. Snyder, qui a été assez aimable pour nous communiquer des détails supplémentaires, nous avons présenté une analyse des différences entre les deux projets dans un article qui fut publié par la revue « Solar Energy » (15).

### Bilan thermique pour la centrale

Nous avons démontré dans un travail de date antérieure (16), qu'il existe une température bien définie pour laquelle le rendement est maximum dans les cycles moteurs d'autovaporisation. Deux phénomènes simultanés se produisent au cours de celle-ci : la vaporisation et le refroidissement de l'eau restante, ainsi que l'indique l'équation différentielle suivante :

$$dQ = r \cdot dM = -M \cdot c \cdot dT \quad (\text{kcal/kg})$$

dans laquelle :

$r$  (kcal/°kg) est la chaleur latente de vaporisation, de l'eau,

$c$  (kcal/°kg) est la capacité calorifique spécifique de l'eau,

$T$  (°K) est la température absolue qui règne pendant la vaporisation,

et  $M$  (kg/kg) représente la masse d'eau nécessaire pour produire un kilogramme de vapeur.

Entre les limites de température de 0 et 100 °C, l'expression qui représente la chaleur de vaporisation de l'eau peut être remplacée par la fonction linéaire  $r = a - b \cdot T$  (kcal/kg), dans laquelle les constantes, d'après E. Schmidt (17) sont  $a = 755,5$  kcal/kg et  $b = 0,58$  kcal/°kg. Ceci nous mène à l'intégrale :

$$\int_M^{M-1} \frac{dM}{M} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{a - bT} \quad (-)$$

d'où :

$$M = \frac{1}{1 - \left( \frac{a - b \cdot T_1}{a - b \cdot T_2} \right)^{1/b}} \quad (\text{kg/kg})$$

D'autre part, le travail réalisé pendant le cycle peut s'écrire :

$$AL = (T_1 - T_2) \cdot \left( 1 - b + \frac{a}{T_1} \right) - T_2 \cdot \ln \frac{T_1}{T_2} \quad (\text{kcal/kg})$$

et le rendement thermique de l'ensemble du cycle d'autovaporisation s'établit à :

$$\eta_{\text{therm}} = \frac{A \cdot L}{M \cdot t_0} \quad [-],$$

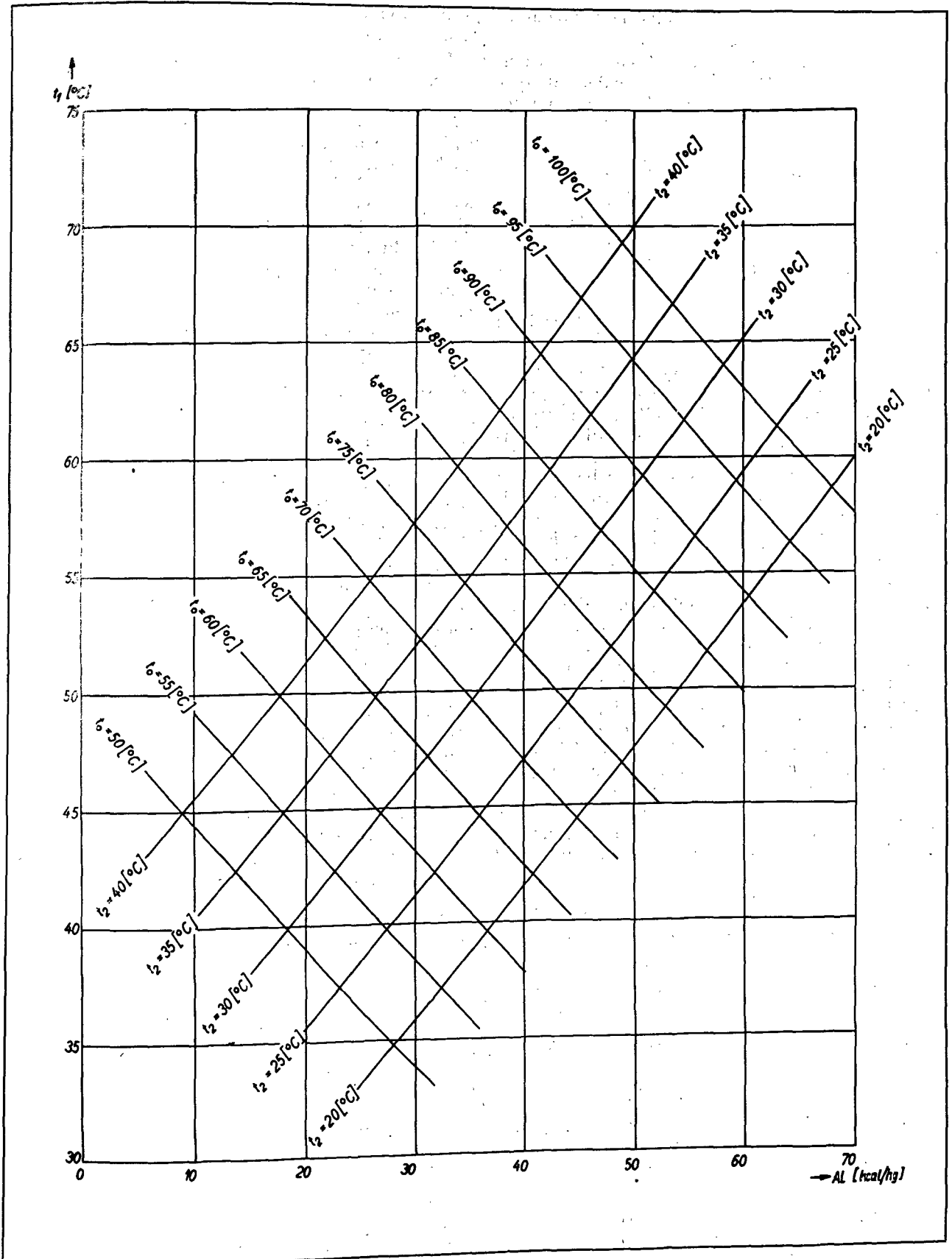


Figure 10. Rapports de températures, garantissant le rendement maximum des cycles moteurs avec autovaporisation

expression dans laquelle  $t_0$  indique la température d'admission de l'eau au bouilleur.

En reprenant les équations antérieures et en rendant la première dérivée de ce rendement (par rapport à  $T_1$ , prise comme variable) égale à zéro, il vient :

$$AL_{\max} = \left[ 1 - b + \frac{T_2}{T_1} \cdot \left( \frac{a}{T_1} - 1 \right) \right] \cdot \left[ \left( \frac{a - b \cdot T_1}{a - b \cdot T_2} \right)^{1/b} - 1 \right] \cdot (a - b \cdot T_1)$$

$$= (T_1 - T_2) \cdot \left( 1 - a + \frac{a}{T_1} \right) - T_2 \cdot \ln \frac{T_1}{T_2} \text{ (kcal/kg)}$$

ce que représente graphiquement la figure 10.

On verra, sur ce graphique, que la température de la vapeur produite dans le bouilleur doit être de 49,6 °C, soit sensiblement 50 °C, pour utiliser l'énergie dans les meilleures conditions possibles entre les limites de température imposées, si celle de l'eau saumâtre à l'admission doit être  $t_0 = 70$  °C et celle qui est maintenue dans le condenseur  $t_2 = 30$  °C. C'est la température choisie comme définitive par Victor Bocič pour son étude thermo-économique de la centrale pilote.

Le tableau 3 donne le bilan thermique pour l'ensemble du cycle. On l'a divisé en deux sections, dont l'une correspond au circuit primaire d'eau saumâtre et de concentré et l'autre au circuit secondaire de vapeur et produit condensé. La figure 11 donne le diagramme de Sankey du bilan thermique rapporté à la chaleur empruntée au collecteur solaire par l'eau salée. On observera qu'il y a des différences entre quelques unes des valeurs numériques du tableau 3 et de leurs contreparties du diagramme de Sankey. Ceci s'explique par le fait que ce dernier ne tient pas compte de l'enthalpie de l'eau saumâtre qui entre dans le circuit primaire. Le tableau et

le diagramme se rapportent à un mètre cube d'eau distillée produite par cette méthode.

Les valeurs portées au diagramme du bilan thermique montrent que le procédé est relativement bon, bien que la fraction de l'énergie solaire convertie en énergie mécanique utile par l'entremise de la turbine à vapeur ne dépasse pas 3,4 p. 100 de la chaleur totale recueillie par le collecteur. Si on se rapporte à l'enthalpie de la vapeur produite au cours du cycle, le rendement thermique s'établit à  $24\,640 \times 100/600\,900 = 3,9$  p. 100, valeur assez proche du maximum représenté par le rendement du cycle de Carnot, qui est de 6,2 p. 100 pour les limites données de 50 °C au bouilleur et 30 °C au condenseur. Les 3,4 p. 100 d'utilisation mécanique de l'énergie solaire reçue paraissent assez bons, si on les compare à ce que donnent les autres procédés, particulièrement si on considère que l'on transforme en même temps de l'eau saumâtre en eau distillée.

Bien entendu, les considérations théoriques, telles que celles du bilan thermique, ne justifient pas en elles-mêmes le coût élevé de réalisation d'une centrale ayant l'ampleur voulue pour essayer le procédé que nous recommandons. Pour cette raison, Victor Bocič a procédé, dans son mémoire, au calcul complet des frais d'installation de la centrale pilote proprement dite et du coût de l'énergie électrique qu'elle produit. Aux fins de ces déterminations, on a admis que le rapport entre les prix de l'eau et de l'électricité est le même que celui qui prévaut actuellement dans la région d'Antofagasta, soit 2 à 1 pour des unités comparables. En d'autres termes, on a supposé un prix du mètre cube d'eau deux fois plus élevé que celui du kilowatt-heure d'énergie électrique. Le coût calculé par Victor Bocič serait de 0,68 dollar des États-Unis par mètre cube d'eau distillée et 0,34 dollar par kWh d'électricité. Même dans les conditions favorables inhérentes à toute centrale pilote, ce prix est raisonnable, particulièrement si on se rappelle que, dans certaines régions de la province d'Antofagasta, les entreprises minières en sont actuellement

Tableau 3. Bilan thermique

Circuit	Position	Enthalpie du fluide admis (kcal/m <sup>3</sup> )	Différence d'enthalpie			Enthalpie du fluide sortant (kcal/m <sup>3</sup> )
			chaleur reçue (kcal/m <sup>3</sup> )	chaleur livrée (kcal/m <sup>3</sup> )	pertes de chaleur (kcal/m <sup>3</sup> )	
Primaire: eau saumâtre et concentré	Condenseur . . . . .	1 128 600	+ 564 260	—	—	1 692 860
	Eau chassée . . . . .	—	—	—	— 933 120	—
	Échangeur . . . . .	759 740	+ 478 380	—	—	1 238 120
	Collecteur . . . . .	1 238 120	+ 731 640	—	—	1 969 760
	Bouilleur . . . . .	1 969 760	—	— 619 000	— 3 940	1 346 820
	Échangeur . . . . .	1 346 820	—	— 478 380	— 29 960	838 480
Secondaire: vapeur et produit de condensation	Bouilleur . . . . .	—	—	—	—	619 000
	Turbine . . . . .	619 000	—	— 24 640	—	594 360
	Condenseur . . . . .	594 360	—	— 564 260	—	30 100

La différence relevée entre quelques valeurs numériques du tableau 3 et celles que donne le diagramme de Sankey s'explique par l'enthalpie de l'eau à 18 °C, température à laquelle elle entre dans l'installation. Cette enthalpie est de 18 100 grandes calories par mètre cube.

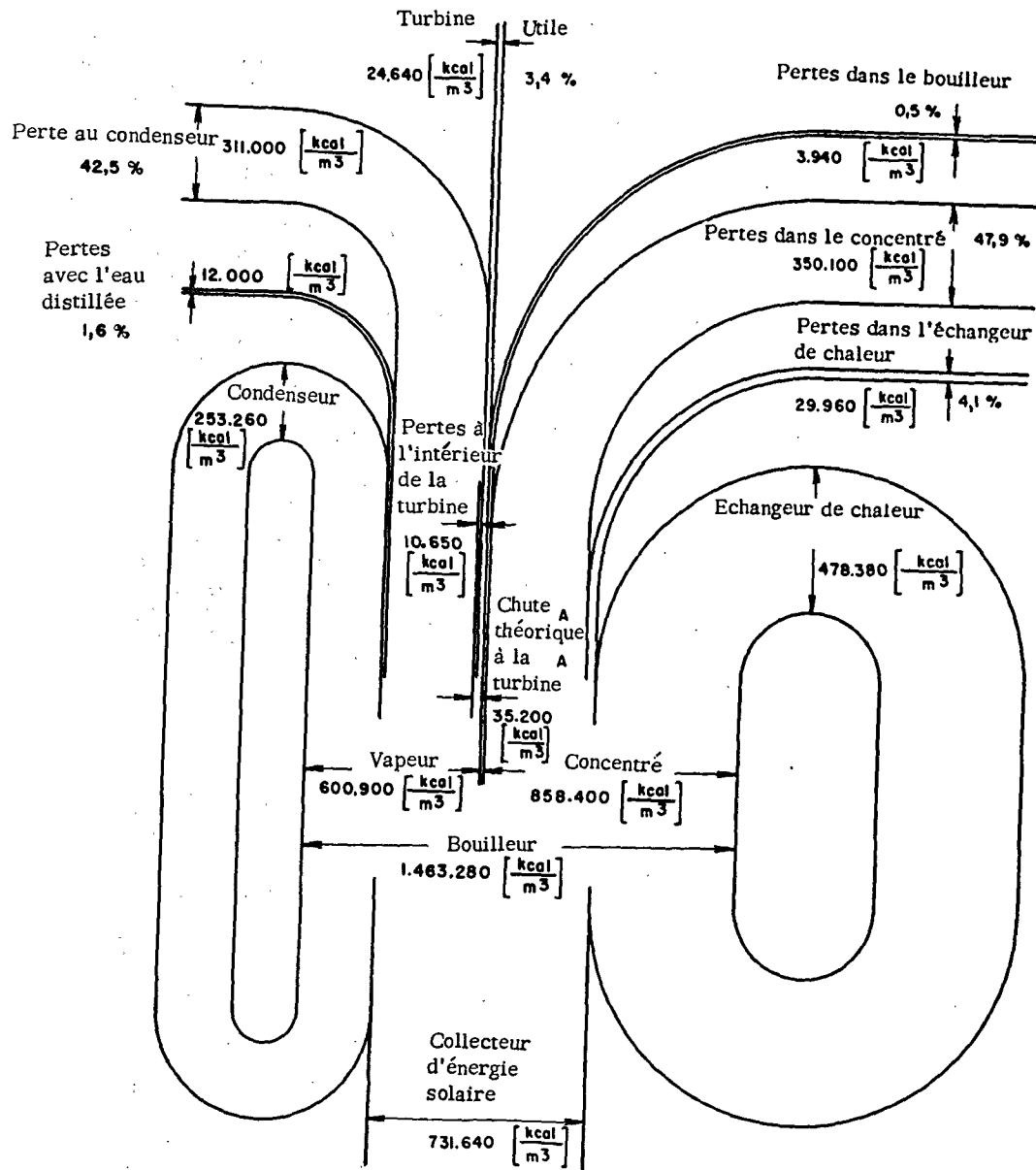


Figure 11. Diagramme de Sankey : bilan thermique

réduites à payer jusqu'à 15 dollars par mètre cube d'eau pure, liquide indispensable à la bonne marche de leurs travaux.

### Considérations économiques

Nous avons eu l'occasion, en août 1960, d'accompagner le Professeur Farrington Daniels au cours d'une visite qu'il fit au désert d'Atacama, et nous lui avons montré le site de la première centrale pilote destinée à faire usage du procédé. Ce site se trouve sur la rive ouest du fleuve Loa, au sud du pont qui le traverse et qui porte la route de Tocopilla à Chuquicamata.

On a donné la préférence à ce site pour deux raisons : en premier lieu parce qu'il est très près des ateliers de María Elena de la compagnie nitratère, qui pourraient venir en aide à la centrale en cas de besoin et, en second lieu, parce que la différence entre les niveaux définis par la cote choisie pour la centrale et celle du fleuve, au fond d'un lit profond, représente une hauteur de chute hydraulique disponible permettant de réaliser une compensation économique des variations de la demande et de la production d'énergie électrique au moyen d'un système constitué par une pompe et une turbine hydraulique.

Notre visiteur s'est déclaré totalement d'accord quant à la valeur du site choisi et s'est montré assez aimable pour suggérer l'emploi d'une matière

plastique nouvelle dans le but de réduire les frais de réalisation du collecteur solaire. Ceux-ci constituent en effet la principale dépense, représentant, pour la centrale projetée, près de 89 p. 100 de l'investissement total prévu. C'est dire que toute réduction appréciable dans le coût de construction du collecteur réduirait sensiblement le prix de l'eau distillée et de l'électricité. Nous sommes convaincus du fait qu'avec des matériaux nouveaux et des machines modernes il serait possible de réduire sensiblement l'investissement au titre du collecteur, aspect de la question qui exige toutefois des études plus poussées.

Même si on laisse de côté la possibilité de réaliser un collecteur à peu de frais, la centrale-pilote envisagée représente déjà une solution au problème soulevé par le manque d'eau potable dans les régions arides du Chili septentrional. L'eau se trouve en abondance dans le sous-sol de nombre de régions de ce désert, mais elle est plus ou moins saumâtre, car le sol lui-même contient une série de sels qui se dissolvent facilement. Le seul cours d'eau important qui traverse le désert d'Atacama devient de plus en plus saumâtre en avançant vers la mer.

Le service de recherches en sciences appliquées de l'Université du Chili procède actuellement à des études, aux salins du lieu dit El Carmen, quant à la possibilité d'utiliser ces terres pour l'agriculture après un lavage. Les premiers résultats de ces recherches ont été fort satisfaisants, confirmant ainsi notre point de vue, suivant lequel la centrale peut aider à résoudre un des problèmes agricoles de notre région septentrionale en fournissant un moyen d'utiliser l'abondante énergie solaire disponible pour élever l'eau saumâtre et la transformer en eau potable. Nous avons donc soumis notre projet à l'attention de la Corporación de Fomento de Chile. Malheureusement, en raison du dernier tremblement de terre survenu dans notre région méridionale, il a été nécessaire d'ajourner toute décision en la matière.

En résumé, il semble indiqué de construire en premier lieu la centrale pilote envisagée, et ce le plus vite possible, de manière à la montrer à l'œuvre. Il s'avérera alors possible de réaliser des centrales plus importantes, visant à résoudre le problème agricole des régions arides du Chili septentrional avec l'aide de l'énergie solaire.

### Références

1. *Chile Turístico e Industrial* (Le Chili touristique et industriel), revue éditée par la Fédération des Étudiants de l'Université de Concepción, Santiago, 1957, p. 67 et suiv.
2. *Anuario DIC 1946*, publié par la Direction générale des renseignements et de la culture, Santiago, 1946, p. 77.
3. *Enciclopedia de Iniciación Cultural «Universitas»* (Encyclopédie culturelle «Universitas»), Barcelone, tome XIII, p. 65 et suiv.
4. *World Sunshine Map*, US Department of Commerce, Weather Bureau, Climatological Services Division, Washington, 1955.
5. Desvignes, F. et Frick, G., Mesures solarimétriques dans le nord du Chili, *Acta Electronica*, volume 3, n° 2, Paris, 1959.
6. Bocić, A., Victor, *Memoria para optar al título de ingeniero mecánico*, Valparaíso, Chili, 1958, p. 173.
7. Petersen, G., Georg, Sur les traces d'Alexandre von Humboldt, ses observations géologiques et géophysiques au Pérou. *Publications de l'Institut de géographie de l'Université de San Marcos*, Lima, 1960, p. 118.
8. Petersen, G., Georg, Notes sur les observations géologiques d'Alexandre von Humboldt au Pérou, publiées à Lima, 1959, p. 20. (Publications de la communauté allemande à Lima.)
9. Arce, R., Isaac, *Narraciones históricas de Antofagasta* (récits historiques d'Antofagasta), Antofagasta, 1930, p. 250.
10. Harding, Josiah, Appareil pour la distillation solaire, mémoire n° 1933, *Proc. Inst. Civil Engr.* n° 37, 1883, p. 284.
11. Telkes, María, Solar Stills, *Proceedings of the World Symposium on applied solar energy*, Menlo Park, Californie, 1956.
12. Référence 6, p. 125 et suiv.
13. Hirschmann, R., Julio, Centrale pilote pour l'utilisation de l'énergie solaire à la production d'eau potable à partir d'eau salée, avec génération simultanée d'énergie électrique, *Scientia*, n° 109, Valparaíso, décembre 1958, p. 195 et suiv.
14. Snyder, Asa E., Projet de centrale marine à énergie thermique, *Solar Energy*, volume III, n° 4, Tempe, Arizona, décembre 1959, p. 49 et suiv.
15. Hirschmann, Julio G., Projet de centrale pilote à énergie solaire pour le nord du Chili, *Solar Energy*, 1961, n° 2.
16. Hirschmann, R., Julio, Notes sur la possibilité d'utiliser l'énergie géothermique au Chili, *Scientia*, n° 1, tome XXI, Valparaíso, mars 1954, p. 25 et suiv.
17. Schmidt, Ernst, *Introduction à la thermodynamique technique*, Berlin, 1958, p. 172.

### Résumé

L'auteur commence par présenter des considérations géographiques sur la région septentrionale du Chili, dont le régime désertique absolu se caractérise par le manque de pluie, puisque la précipitation annuelle n'y dépasse pas une moyenne de 1,4 mm., pour la province d'Antofagasta, sur laquelle

porte ce travail. Une autre caractéristique de la région est l'abondance générale de minéraux, ainsi que de divers sels solubles, que l'on trouve dans le sol du désert. En conséquence, l'eau du sous-sol est plus ou moins saumâtre, ainsi que celles du fleuve Loa, le seul qui traverse le désert, qui deviennent de

plus en plus salées le long de son cours, bien qu'elles sortent pures des neiges de la Cordillère.

Après avoir indiqué les données solarimétriques dont on dispose jusqu'à maintenant pour cette région, qui confirment qu'elle présente une situation extrêmement favorable pour l'utilisation de l'énergie solaire, l'auteur donne certains renseignements historiques sur les premières installations utilisées à cette fin, notamment l'alambic solaire de « Las Salinas » qui a fonctionné, sur une échelle industrielle, pendant plus de quarante ans.

On mentionne ensuite les évaporateurs solaires de Coya Sur, seule installation de quelque importance qui existe actuellement dans le pays pour faire usage de l'énergie solaire et inaugurée en 1951. Les propriétés physiques déterminées jusqu'à présent mettent en lumière la dépendance marquée entre les variations mensuelles de la chaleur de vaporisation et de l'énergie solaire incidente, phénomène pour lequel on a établi un rendement, quotient pris entre ces deux quantités, qui dépasse environ 50 p. 100 en moyenne.

La partie essentielle du mémoire est consacrée à la description et à l'établissement des bases thermodynamiques théoriques d'une centrale à échelle réduite projetée pour le désert d'Atacama, dont le but sera de transformer les eaux saumâtres du fleuve Loa en eau distillée, en faisant appel à l'énergie solaire et en produisant en même temps du courant électrique.

L'auteur, en s'appuyant sur le schéma de l'installation, décrit son fonctionnement qui, en principe, est le suivant. Dans un premier circuit, l'eau saumâtre est chauffée dans un collecteur solaire à plan incliné ayant une surface de 4 280 m<sup>2</sup> et portée à une température de 70 °C; puis, après avoir traversé un accumulateur où l'air est séparé de la phase liquide, elle pénètre dans un bouilleur à vide, dans lequel une partie de l'eau est vaporisée, empruntant dans ce processus la chaleur du reste de ce même liquide. Dans un deuxième circuit, la vapeur ainsi produite passe par une turbine où elle réalise un travail mécanique qui produit de l'énergie électrique. Finalement, la vapeur qui sort de la turbine se condense, et elle est disponible sous forme d'eau distillée. L'usine alimentée en eau saumâtre froide à 18 °C produit en moyenne 9,5 m<sup>3</sup> d'eau distillée par jour et débite une puissance électrique utile de 50 kW.

Dans les conditions thermodynamiques et économiques les plus favorables, la température de la vapeur produite dans l'autobouilleur est fixée à 50 °C. Ceci se base sur le raisonnement mathématique suivant. En faisant intervenir, dans l'équation différentielle de l'autovaporisation, la chaleur de vaporisation en tant que fonction linéaire entre les limites données et en supposant que la première dérivée du rendement thermique du cycle moteur d'autovaporisation est égale à zéro, la température de la vapeur produite étant la variable, on obtient une formule qui indique, pour le travail maximum théoriquement possible, la température qu'il faut maintenir dans l'autovaporisateur pour certaines températures fixes de l'eau à son admission au bouilleur et au condenseur. Cette formule est représentée graphiquement par un diagramme mis au point par l'auteur, qui permet de trouver facilement la température en cause.

Un bilan thermique, avec sa représentation graphique par diagramme de Sankey, termine les considérations théoriques. En se servant de ce bilan, on a calculé un rendement de 3,4 p. 100 pour l'énergie utile de la turbine par rapport à l'énergie thermique recueillie au collecteur solaire. Pour le calcul économique, dans les conditions décrites, et en admettant, pour le rapport entre les prix de 1 m<sup>3</sup> d'eau et de 1 kW/h d'énergie électrique, le chiffre de 2 à 1 qui existe actuellement dans la province d'Antofagasta, on aboutit à 0,68 dollar par m<sup>3</sup> d'eau distillée et 0,34 dollar par kW/h d'énergie électrique. Dans certaines parties de cette région, les entreprises minières doivent actuellement payer jusqu'à 15 dollars par m<sup>3</sup> d'eau pure.

L'auteur termine son travail par quelques considérations économiques se rapportant, plus particulièrement, à la possibilité de réduire le prix du collecteur solaire qui, dans l'usine envisagée, représente près de 89 p. 100 des investissements totaux. Mais, sans même se servir d'un collecteur plus économique, la centrale pilote envisagée peut déjà être considérée comme représentant une solution du problème soulevé par le manque d'eau potable dans les zones arides du nord du Chili. En conséquence, l'auteur estime qu'il est recommandable de construire cette centrale pilote le plus tôt possible, pour démontrer qu'elle est capable de fonctionner effectivement et, par la suite, de réaliser des centrales plus grandes visant à résoudre le problème agricole de la région en faisant appel à l'énergie solaire.

## SOLAR EVAPORATION AND DISTILLING PLANTS IN CHILE

### Summary

The author first describes the geography of the North of Chile, a desert area with an average annual rainfall in the province of Antofagasta of 1.4 millimeters. Another characteristic of this area is the

abundance of mineral deposits, especially various soluble salts which are mixed with the desert soil. For this reason, the water in the subsoil has a high salt content, and the River Loa, the only river

that crosses the desert, gets more and more salty as it progresses, in spite of the fact that its source is the pure snow of the Andes mountains.

After indicating the solar measurements so far carried out in this region, which verify the extraordinarily favorable conditions for solar energy purposes, the author gives some historical details of the first installations that have been used for this purpose. The most important of these applications was the solar distillery plant in "Las Salinas", which was in industrial use for more than forty years.

The author then refers to the solar evaporators at Coya Sur inaugurated in 1951, the only important solar energy plant now existing in Chile. Of the physical characteristics noted to date, one of the most striking is the marked dependency of the monthly variations of evaporation heat on the incident solar energy. An efficiency factor has been established, being the ratio between these two factors, which has an average value of a little more than 50 per cent.

The main part of the paper is devoted to the description and theoretical thermodynamic basis of a pilot plant project for the Atacama desert, which is intended to transform the salt water of the River Loa into distilled water by using solar energy, generating, at the same time, electric power.

With the aid of diagrams, the author describes the operation of this plant. In the primary circuit, salt water is heated in an inclined plane solar collector of 4 280 m<sup>2</sup> area to 70°C., passes through an accumulator to separate the air from the water and then to a vacuum evaporator where part of the water evaporates, taking the necessary heat from the rest of the water.

In the secondary circuit, the steam thus produced passes through a turbine to generate electric energy, and finally is condensed to provide distilled water. If the salt water intake is at 18°C, the plant will produce an average of 9.5 m<sup>3</sup> of distilled water per day and 50 kW of useful electrical energy.

Under the most favorable thermodynamic and economic conditions, the steam temperature on leaving the evaporator is set at 50°C. This is based on the following mathematical procedure. Assuming a linear relationship for the latent heat of evaporation, between the given limits, in the differential equation of the auto-evaporation process, and equating to zero the first derivative of the thermal efficiency of the motor cycle with respect to the temperature of the steam produced, an equation may be formed indicating the temperature that should be maintained in the evaporator for the theoretical maximum possible work, for given temperatures of the hot water entering the evaporator and in the condenser. This equation is represented graphically in such a manner that the temperature in question can easily be obtained.

A heat balance, represented by a Sankey diagram, concludes the theoretical treatment. By means of this balance an efficiency of 3.4 per cent is obtained between mechanical energy produced and solar energy intake. The economic calculation, for the conditions described, assuming the price of 1 m<sup>3</sup> of water to be twice that of 1 kW of electrical energy, as is the case at present in Antofagasta province, gives a price of US \$0.68/m<sup>3</sup> of water and US \$0.34/kW of electrical energy. In some parts of this region, the mining companies have to pay up to US \$15/m<sup>3</sup> of water.

The author concludes his paper with some economic considerations, referring especially to the possibility of lowering the cost of the solar collector, which represents 89 per cent of the total investment in the pilot plant. But even without a cheaper form of collector, the pilot plant projected already provides a solution for the lack of fresh water in the arid zones of North Chile. For this reason, the author considers it justifiable to construct this pilot plant as soon as possible so as to demonstrate its effectiveness, and to follow this up with larger plants designed to solve the agricultural problem of this region, by using solar energy.



## SOLAR DISTILLATION RESEARCH AT THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA

*Everett D. Howe \**

The Sea Water Conversion Project of the University of California began research early in 1952 on several methods for recovering fresh water from the sea. This work was undertaken at the request of the California State Legislature and has derived most of its financial support from State of California appropriations. The general objective of the program is to determine whether any scheme can be found or developed which will produce large quantities of fresh water at a low unit cost. Tentative price goals were set at about 38 cents per thousand U.S. gallons for municipal supplies and 12 cents per thousand gallons for irrigation supplies, these prices corresponding to the highest prices then being paid for the two types of water supply indicated.

An examination of the cost figures for water distillation as practised in 1951 indicated that fuel costs represented more than half of the total cost of the product. Thus, it was evident that consideration should be given to schemes using "free" energy. Solar distillation, the use of waste heat, and the possible use of the small temperature differences between the surface waters and the deep waters of the ocean were chosen for the first investigations. Since that time, many other phenomena and schemes have been investigated as possible solutions to the serious problem of water supply in a semi-arid state, such as California.

The experimental program on solar distillation was initiated in January 1952, when Dr. Maria Telkes was employed as temporary consultant to the Project. Using her previous experience with solar distillation, Dr. Telkes supervised the design of the first six units and the construction of the first unit. The latter was placed in service in February 1952 and the other five at various times during the spring and summer of that year. Since 1952, the Project staff members have designed and tested various configurations of simple solar distillers. All of these units were tested at the Department of Engineering Field Station at Richmond, California. The solar test area lies within a few hundred feet of the shore of San Francisco Bay, just opposite the Golden Gate and at a latitude of  $37^{\circ}55'$  N. A photograph of the solar distillation test area is shown in figure 1.

The objective of all of the tests has been to determine whether a solar distiller could be devised or developed which would be capable of producing large quantities of distilled water at low unit costs.

Since the major cost in solar distillation is the amortization of capital, the criterion of low unit cost of product is synonymous with low initial capital cost. To date, the experience on the University of California project indicates initial capital costs per daily unit of capacity to be several times as much as the corresponding costs for other types of distillation equipment. Before dealing further with the matter of costs, it is well to consider the performance characteristics of the units tested.

### Description of University of California solar stills

The several configurations of simple solar stills which have been tested at the University of California are indicated in table 1. It will be noted that, although some attempts were made to use plastics for the transparent cover of the stills, the majority of the tests have used glass for this purpose. The reason for this lies in the fact that sheet plastic materials with properties attractive for this application have become available only recently.

From table 1, as well as from the photograph of figure 1, it will be apparent that all of the tests have been conducted on units fabricated in the shop and supported above the ground surface. This type of construction requires that the water tray be insulated on its underside and is in contrast to the on-the-ground, field-constructed type used by the U.S. Department of the Interior contractors at the Florida installation. Shop fabrication has seemed to have potential economies for mass production which outweigh the added cost of insulation. Prototype units would be placed on the ground since the test units were mounted above ground largely for convenience in controlling test conditions and making measurements.

### Performance characteristics

The performance of a particular solar still in a given location will depend upon the solar altitude, the weather, and the haziness of the atmosphere. Figures of average or total annual production are important from the view-point of the user who may have to depend on a solar still, but are affected more by weather and haziness than by the efficiency of the still. Thus, for comparison of different stills, data will be limited to those for clear days with radiation intensities, as measured with Eppley

\* University of California, Berkeley, California.

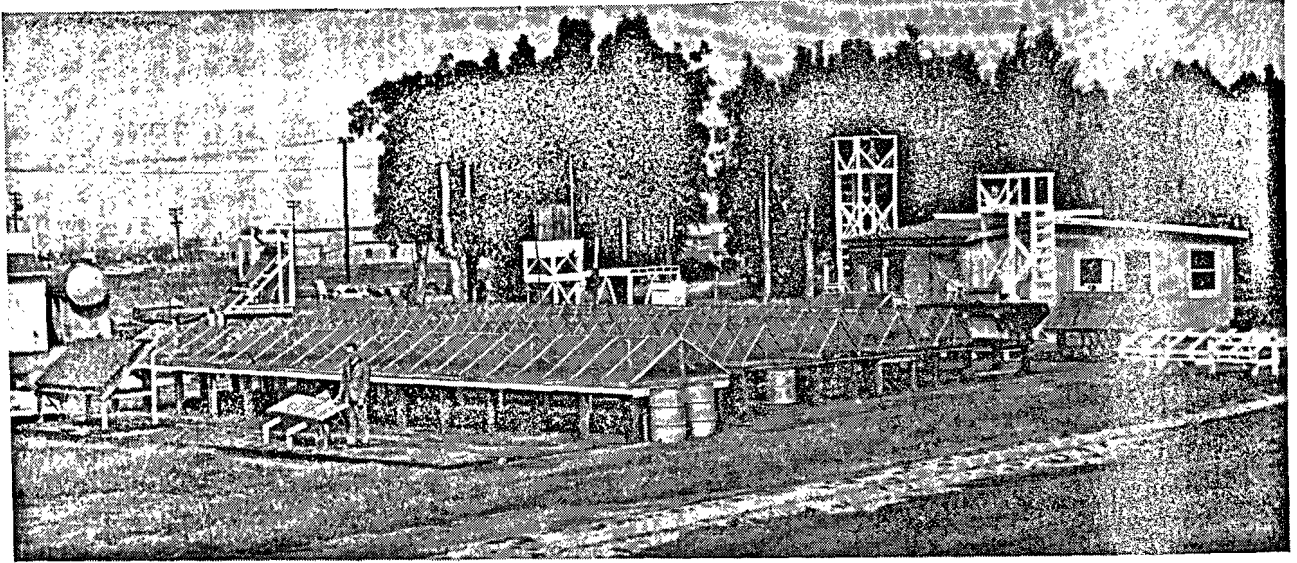


Figure 1. Solar distillation test area, Richmond, California: University of California Sea Water Conversion Project. View looking northeast, pyrheliometers on tower center rear

Table 1. Solar distillation equipment at University of California

Unit No.	Brief description	Tray dimensions	Area (sq ft)	Date placed in operation	Situation as of Jan. 1961
1. . . . .	Greenhouse, with vertical mirror-back	44" × 83.5"	25.5	Mar. 1952	In operation
2. . . . .	Greenhouse (lab. model)	2' × 2'	4.0	May 1952	Dismantled
3-7. . . . .	Greenhouse, with symmetrical glass hood	47.3" × 50.67'	199.9	Sept. 1952	No. 3 dismantled, 4, 5, 6, 7 in operation
8. . . . .	Tubular glass	(2 tubes) 4.125" × 59" ea.	3.38	Fall 1953	Out of service
9. . . . .	Tubular plastic	12" × 72" approx.	5.92	Dec. 1953	Dismantled
10, 11,* 12.	Tubular plastic	(2 trays) 23.25" × 52.375"	203.0	Sept. 1954	Dismantled
13. . . . .	Parabolic reflector	36" × 23.176'	71.6	Apr. 1954	Dismantled
14. . . . .	Greenhouse, with aluminium reflector along back	18" × 25.5"	3.19	June 1955	Dismantled
15. . . . .	Wick still	43" × 82.5"	25.5	Aug. 1956	Out of service
16. . . . .	Greenhouse, with symmetrical glass hood	95.5" × 51.67'	411.2	Aug. 1957	In operation
17. . . . .	Greenhouse, with symmetrical glass hood	44.5" × 90"	27.8	Nov. 1958	In operation
18. . . . .	Inclined natural convection, with rear aluminium condenser	Originally 4' × 8' Modified to 47.25" × 84.25"	32.0	June 1958	Dismantled
19. . . . .	Forced convection system, with solar heating pond, solar air heater, evaporator and condenser	Pond: 10' × 10' Air heaters: 23.5" × 46.5"	27.6 22.74	Sept. 1958	Out of service
20. . . . .	Australian molded asbestos-cement tray	41.75" × 68.5' less two 3" bottom openings	19.8	Mar. 1959	In operation
21. . . . .	Inclined tray with longitudinal baffles	47.25" × 95.5"	31.3	May 1959	In operation
22-33,* 34.	Inclined tray with longitudinal baffles	22.5" × 95.625"	14.94	Mar. 1960	In operation

\* Not pertinent to this report.

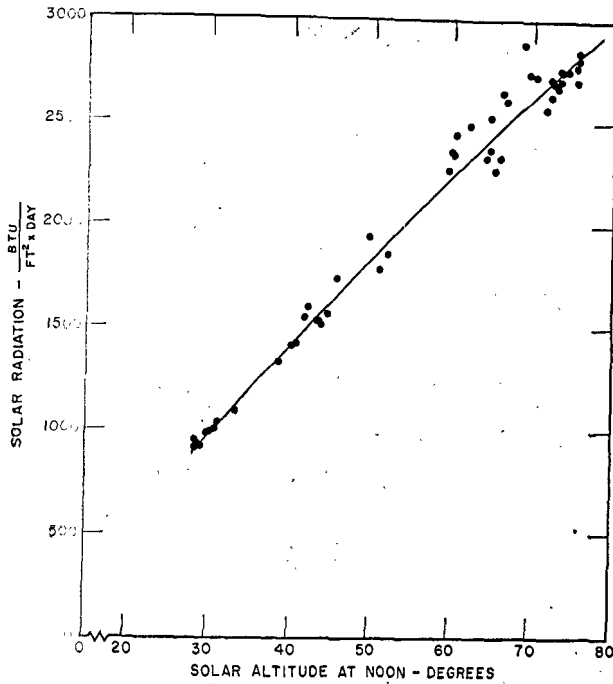


Figure 2. Solar radiation on a horizontal surface on clear days during 1960, Richmond, California

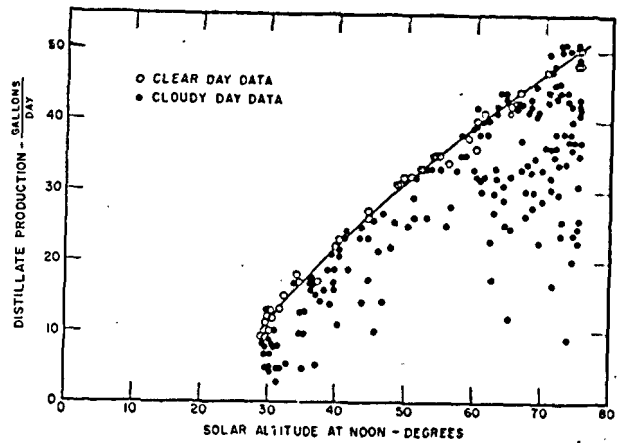


Figure 3. Performance of a solar still, 1958 (University of California still No. 16; area 411 ft<sup>2</sup>)

pyrheliometers, consistent with the solar altitude. This point is illustrated in figures 2 and 3. Figure 2 shows observed radiation intensities as functions of solar altitude for selected clear days and figure 3 shows the production rate for a given solar still as a function of solar altitude. The data in figure 2 show some scatter, which probably reflects the variable clarity of the atmosphere. This data is as consistent as similar data reported by I. F. Hand (1). The clear days were selected by inspection of recorder charts from the pyrheliometers. The criteria used in reviewing the charts were noon-time radiation

intensities and smoothness of curves, the latter being the more important. Figure 3 indicates that the clear-day production data follow a definite curve but that the other data form only a scatter diagram. Thus, in the following comparisons of performance characteristics, the data considered will be limited to that for clear days.

Data for some 50 clear days were available for the calendar year 1960. Production data were recorded in terms of volume and the daily production rates were reduced to production per unit area, the area used in each case being that inside the boundaries of the water tray. Seven units have been selected for comparison, four of them having horizontal water trays and symmetrical sloping clear glass covers. The other three are arranged so that the effective incident solar energy intensity is increased for low solar altitudes. Descriptive information concerning these units is given in table 1 and detailed photographs are shown in figures 4 and 5. The

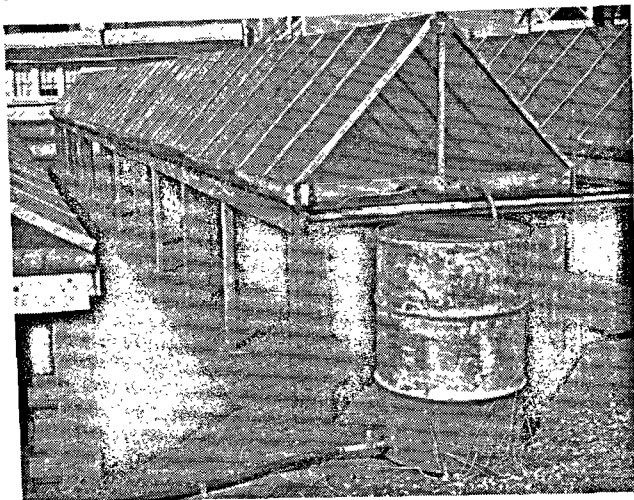
Table 2. Monthly production data, 1960. University of California solar distillation equipment (All figures in U.S. gallons)

Month	Unit No. 1	Unit No. 7	Unit No. 16	Unit No. 17	Unit No. 20	Unit No. 21 <sup>a</sup>	Unit No. 31 <sup>b</sup>
January . . . . .	16.94	67.3	114.4	6.66	5.07		
February . . . . .	38.05	118.4	233.9	17.50	17.45	56.94	
March . . . . .	41.55	180.7	387.9	25.82	27.86	72.96	30.02
April . . . . .	72.89	386.9	821.1	52.53	53.39	104.10	41.34
May . . . . .	71.64	429.0	997.2	66.89	66.92	106.20	57.89
June . . . . .	63.13	382.4	760.3	62.69	58.78	78.13	45.96
July . . . . .	60.02	360.4	603.8	56.61	59.46	77.08	43.94
August . . . . .	66.35	325.3	574.2	49.88	57.51	84.20	48.38
September . . . . .	34.47	297.1	338.7	21.26	21.52	50.87	23.47
October . . . . .	48.54	196.6	350.5	24.28	27.53	77.68	33.03
November . . . . .	16.05	66.2	107.7	7.82	8.31	27.93	11.71
December . . . . .	14.04	51.7	86.8	5.35	5.57	24.65	10.21
TOTALS <sup>c</sup>	543.7	2 862.0	5 376.5	397.3	409.4	760.7	345.9

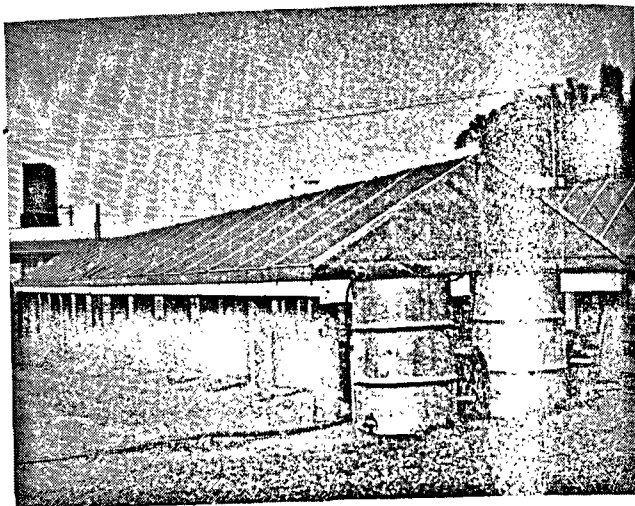
<sup>a</sup> This unit placed in service on February 6, 1960.

<sup>b</sup> This unit placed in service on March 12, 1960.

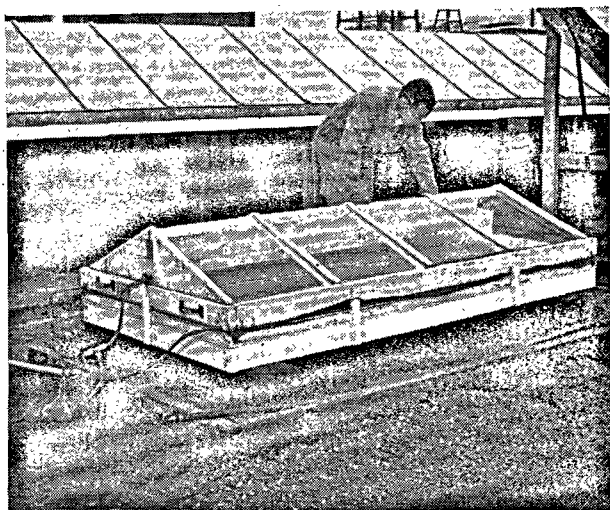
<sup>c</sup> These figures do not include the output for approximately 26 days of rainy weather and 50 days when no records were made, the latter during the period June to December.



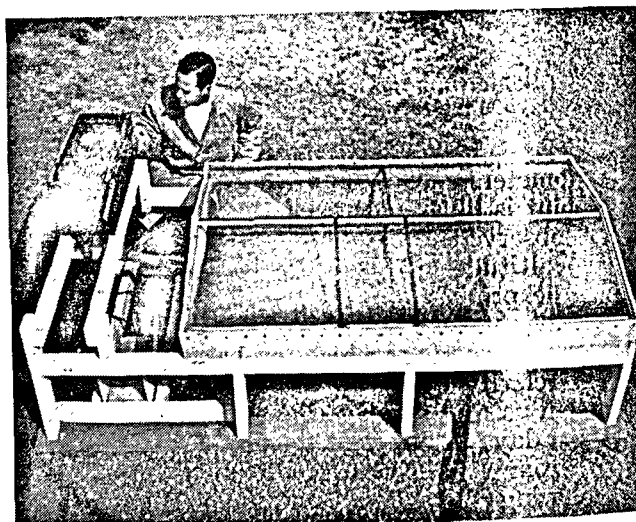
Still No. 7  
(4' × 50')



Still No. 16  
(8' × 51')



Still No. 17  
(45' × 90')



Still No. 20  
(42' × 68')

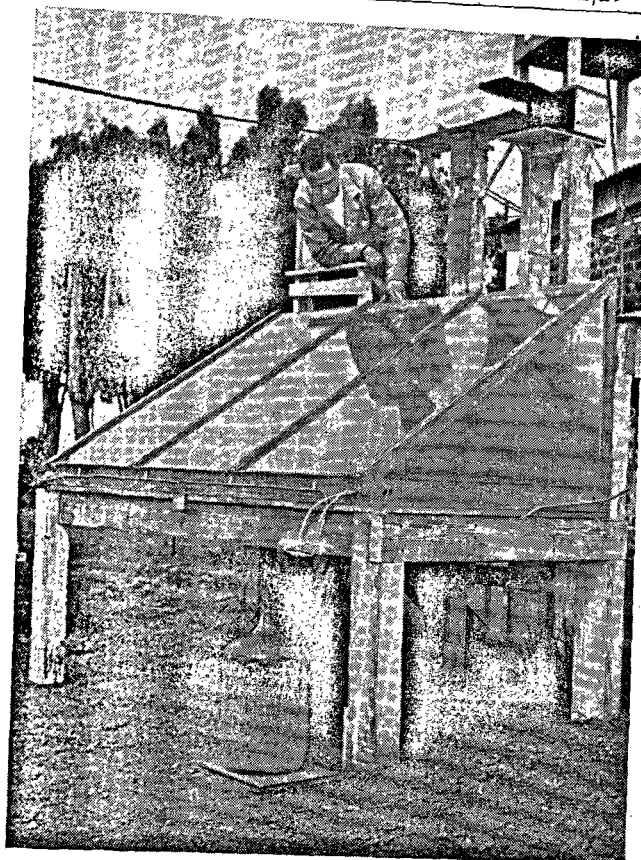
Figure 4. Greenhouse—type solar stills (University of California Sea Water Conversion Project)

production by the various units of distilled water for the year 1960 is indicated in table 2.

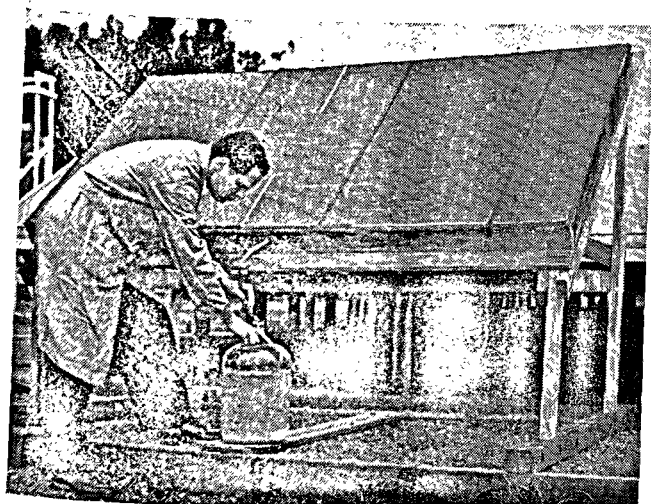
Considering first the production rates for the four symmetrical type units shown in figure 4, the pertinent data are plotted in figure 6. In each case, the unit production rate versus the observed diurnal solar radiation intensity has been plotted. The scatter of the points reflects atmospheric variability, as suggested by the variation of radiation measurements in figure 2, as well as local variations of atmospheric temperature and wind. Since the general arrangement of the points suggests a linear variation, the centroidal method was used to find the best straight line representing these points. The centroidal method gives results approaching those of the least

squares method, is much shorter than the latter, and is regarded as sufficiently accurate for the purpose.

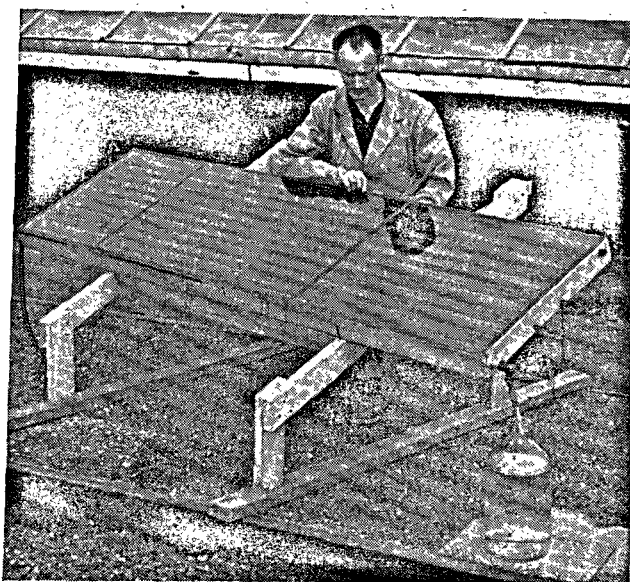
Figure 7 is a composite chart on which are shown the average lines from figure 6. Also shown in figure 7 is an average line for Still No. 16 using 1958 data. Radial lines are drawn on figure 7 to indicate values of efficiency. These values were determined by using the ratio of the heat energy required to evaporate water to the incident solar energy. The latent heat used in these calculations was assumed constant at 1025 btu per pound, the value for 120°F. By inspection it is seen that all of these stills have efficiencies which increase with solar intensity and that the rates of increase of efficiencies and of production rates vary from one still to another.



Still No. 1  
(4' x 8')  
with mirror back



Still No. 21  
(4' x 8')  
38° tilt — longitudinal baffles



Still No. 34  
(2' x 8')  
25° tilt — longitudinal baffles

Figure 5. Tilted-type solar stills (University of California Sea Water Conversion Project)

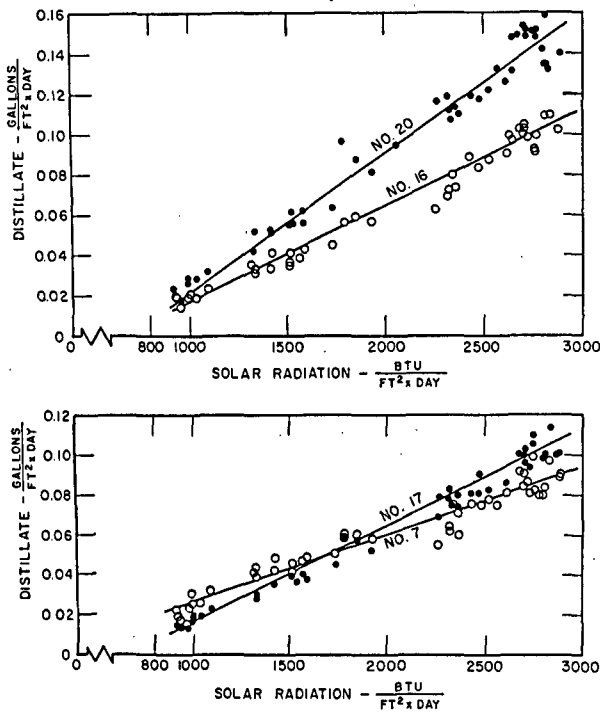


Figure 6. Production rates of greenhouse-type solar stills on clear days during 1960

The superior performance of No. 20, as compared with the other greenhouse-type units, is due to several factors, among which are the following:

(a) Greater freedom from leakage of air and water than the others. This unit is molded from a single sheet of transite so that both the distillate channels and brine tray are tight. Also, the glass cover is more secure than in the others;

(b) Better tray insulation than the large units. The insulation on No. 20 consists of glass wool 2" thick, whereas that on Nos. 7 and 16 is only 1" thick;

(c) Flatter glass angle than the others. No. 20 has a glass cover which slopes at about 20°, whereas No. 7 has an angle of 45° and No. 16 an angle of about 33°. The flatter angle permits solar energy to penetrate the glass through a greater range of hour angles.

It is appropriate here to observe that the efficiencies of the several units on a given day seem to be in the approximate order of the glass temperatures, i.e. the higher the glass temperature, the greater the efficiency. Thus, for this type of still, the glass temperature should be highest for the units having the smallest ratios of glass area to evaporating area and for those having the best insulation under the tray. A further factor suspected of being important is the distance from the tray water surface to the glass. For very small magnitudes of this distance, the mass transfer should occur primarily by diffusion rather than by convection and would be more effective. Definitive data on this point are not yet available. In any event, Still No. 20 logically seems to have

dimensional characteristics which make for superior performance as compared with Nos. 7, 16, and 17.

The reduced effectiveness of Still No. 16 in 1960, as compared with 1958, is of interest. This unit and No. 7 were used for the investigation of paints suitable for the wood trays used in these stills. The paints tried had included various commercial products, that on the stills in 1958 being a black vinyl material. As this was no longer available in 1959, a new material, "Micaseal", was put on. This material was rather expensive to apply and has not lasted well, its present state being one characterized by the presence of several large blisters on the tray bottoms. The deterioration of output of No. 16 is due in part to the presence of the dry spots caused by these blisters and in part to a probable low coefficient of absorptivity for solar energy.

Figure 8 shows the performance data for Still Nos. 1, 21, and 34, plotted as a function of solar altitude. Curves have been faired through the experimental points, using visual estimates for selecting the positions of the lines. Plots of these data on co-ordinates of solar radiation intensity on a horizontal surface would not seem appropriate because the effective solar intensity within these stills may be appreciably greater than that in the greenhouse-type units.

In comparing these three units, it should be noted that No. 1 is a mirror-backed unit with horizontal tray and 1" thick insulation, and that Nos. 21 and 34 are tilted flat-type units with 2" thick insulation. The three units are mounted at different angles, No. 34 being tilted at 25° with the horizontal and

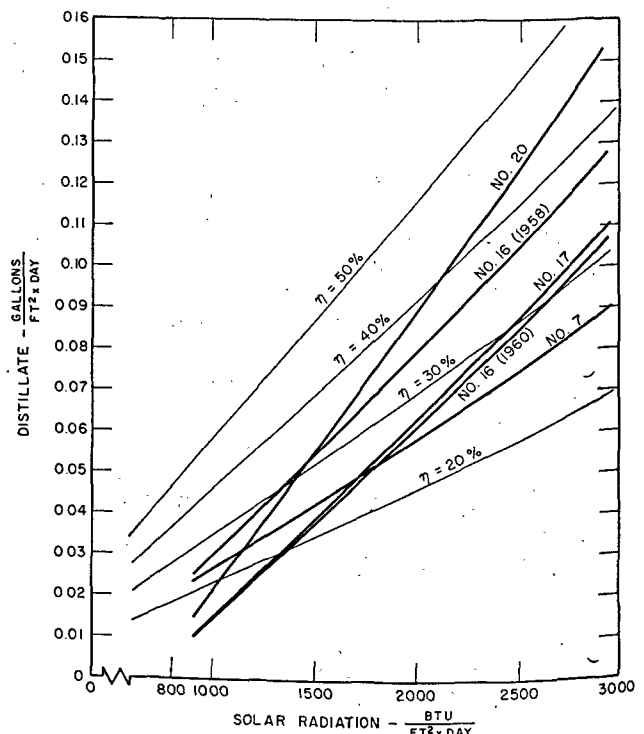


Figure 7. Summary of production rates of greenhouse-type solar stills

No. 21 at about  $38^\circ$ , and No. 1 having a front glass sloped at about  $32\frac{1}{2}^\circ$ .

The curves for Nos. 1 and 34 are drawn with positive slopes, while that for No. 21 has a maximum point at about  $52^\circ$  solar altitude, at which angle the noon-time solar beam would be perpendicular to the face of the still. It will be evident on reflection that, for all angles greater than this, the effective width of the receiving face of No. 21 will be less than its actual width, and hence will receive less energy than if it were flat. In contrast with this, it will be observed that No. 1, with its flat tray and vertical north face, will not suffer any diminution of its effective aperture below the actual width of the water tray. The case of No. 34 is intermediate between those of Nos. 1 and 21. The angle of tilt of  $25^\circ$  used for No. 34 results in a minimum noon-time angle of about  $80^\circ$  between the solar beam and the receiving face of the still at the time of the summer solstice. Since the effective width of the still receiving insolation is proportional to the sine of the above angle, the radiation received will be over 98 per cent of that incident on a horizontal surface.

Figure 9 repeats the faired curves of figure 8 and also shows the best curve from figure 7, the transformation to altitude angle from radiation intensity having been made according to the faired curve of figure 2. Inspection of the curves on figure 9 clearly indicates the considerable gain possible by utilizing some means of increasing the solar energy intensity

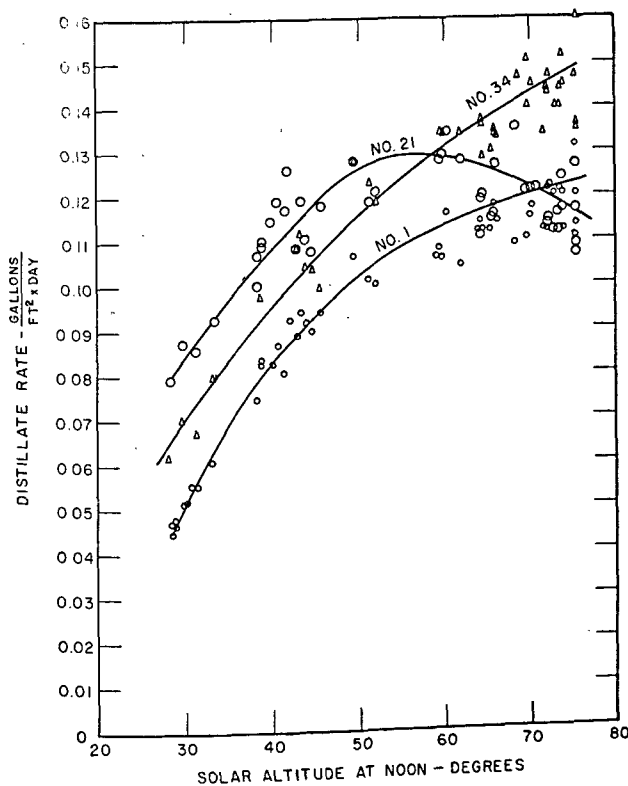


Figure 8. Production rates of tilted-type solar stills on clear days during 1960

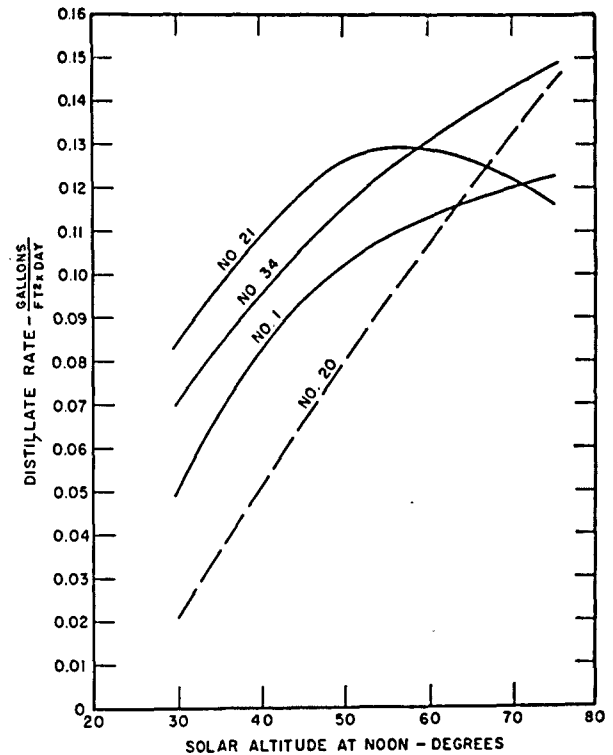


Figure 9. Summary of production rates of tilted-type solar stills on clear days during 1960

in the solar still for low sun angles. Further justification of this conclusion is to be found in table 2. Due to incompleteness of observations in other months, the period of March through September has been totalled with the result shown in table 3. This table serves to confirm the impression from figure 9, namely, that the flat tilted units yield performance data markedly superior to those of the greenhouse-type with horizontal water tray.

### Discussion

The experimental program at the University of California has given greatest emphasis to the simple solar still as opposed to the multi-effect solar still or to solar water heating for use in multi-effect stills. While the advantages of these other schemes are

Table 3. University of California solar still output, March through September, 1960\*

Still No.	Area (ft <sup>2</sup> )	Total gallons	Gallons per ft <sup>2</sup>
1 . . .	25.5	410.0	16.2
7 . . .	199.9	2 361.8	11.8
16 . . .	411.2	4 483.2	10.9
17 . . .	27.8	335.6	12.1
20 . . .	19.8	345.4	17.4
21 . . .	31.3	632.5	20.2
34 . . .	14.9	297.2	19.9

\* Includes estimated output for the period March 1 to March 11 inclusive.

recognized, the present discussion will be limited to the simple solar still. The obvious disadvantage of the simple solar still is its lack of re-use of the heat energy—a disadvantage which must be weighed against the advantages of simple construction and relatively low cost.

In contemplating the possible design of a large solar distillation plant, the two most important considerations would be the selection of the type of still and the selection of the materials to be used in construction. Experience on the University of California Project may be helpful in both these areas since several of the units tested have been in continuous operation for over nine years.

Considering first the matter of materials, the units built on the University of California Project have utilized wood trays in most cases, with metal trays having been used in some. The wood used has been marine plywood for tray bottoms and structural redwood for side rails and ends. Special precautions have always been taken to seal the wood when painting. In spite of these precautions, the paint coatings have contained minute imperfections through which the sea water could come into contact with the wood. By capillarity, this water then works its way through the wood, evaporates from the outer surface, and leaves the precipitated salt crystals trapped between the wood fibers. This type of seepage has caused considerable separation of the fibers on the redwood side rails of the older units. Thus, the use of coated wood does not seem satisfactory in places where sea water may come in contact with it. The alternative of using wood impregnated with plastics has not been investigated by the University of California Project but may have some merit.

The use of glass as opposed to plastics for the transparent cover is a matter of economics. The desirable properties of glass—stability with respect to time, wetability and rigidity—must be weighed against the disadvantages of the heavy construction required to support its weight, the difficulty of sealing edges, and the possibility of breakage. The nine years of experience with glass covers at Richmond has demonstrated that damage due to wind and weather is slight, less than one per cent per year of the glass panes having been replaced. Plastic sheet materials have the advantages of extremely light weight and low cost per unit area. With further development, they may be produced with high stability under the effects of solar irradiation and contact with warm water vapor. Thus, it may be concluded that present designs should probably utilize glass but that future designs may take advantage of the low cost and weight of plastic covers.

Turning now to the design of the solar still unit itself, the performance data presented in figures 7 and 9 indicate the production rates of the flat tilted units to be quite superior to those of the greenhouse-type units when based on unit area of the water surface. Data presented by Telkes (2) and by the Bjorksten Research Laboratories (3) seem to be in agreement with this conclusion. The

few clear-day results presented by Telkes for stills tilted at 30° show production rates very similar to those for University of California Still No. 34 as shown on figure 8. The major difference between these two designs lies in the use by Telkes of a wick for holding the water and the use of longitudinal baffles by the University of California Project design. The wick-type unit requires continuous feed for water supply, with the accompanying possible loss of heat in the effluent brine. The longitudinal baffle construction permits batch-type operation, with refilling possible during the non-operating night hours. The Bjorksten results deal with a flat-type wick unit similar in many respects to the Telkes units. The one major difference lies in the method of support, the Bjorksten units being suspended from horizontal wires while the Telkes units are supported by posts in the ground. The Bjorksten tests were made with some of the wicks in a vertical plane and others tilted toward the south making an angle of 15° with the vertical. Results of a few clear days indicate unit outputs of the same order of magnitude as those for the Telkes units.

The flat-type unit should be economical to construct since the glass cover is parallel to the average water surface and is nearly equal in area to it. Also, it is flexible in that it will operate at any angle between the minimum angle with the horizontal at which water will slide down the glass rather than drip, and the maximum angle required to make the solar beam perpendicular to the glass at noon on the day of the winter solstice. Thus, one might arrange a flat-type installation of solar stills with groups of the units at several different angles in order to assure nearly constant a year-round production capacity.

The cost of large solar stills of the greenhouse type is uncertain because of the lack of experience with this type of construction. The deep-basin unit constructed by the U.S. Department of the Interior from the Löf design (4) is reported to have cost \$5.25 per square foot and apparently could produce, on the average, about 0.05 gpd per square foot. Thus, the cost per gpd is of the order of \$100. Bloemer *et al.* (5) reported tests of this unit and indicate ways in which such a unit could be built more cheaply and for higher productivity.

While detailed design has not been made, the writer believes that flat tilted stills using the longitudinal-baffle type of construction could be mass produced at a cost per unit area somewhat less than that for the deep basin still. The stills would be mounted on a series of inclined embankments produced by the usual earth-moving machinery. The trays would be four or five feet wide and would be lined either with sheet copper foil (about 15 cents to 20 cents per square foot of tray area) or with black polyethylene sheet. These linings would be backed up by machine-molded vermiculite concrete stringers running across the width of the stills and spaced closely enough to support the tray. Other machine-molded concrete members would



complete the upper and lower borders to furnish support and seal for the glass panes. Assembly would be in the field, using a movable jig for securing satisfactory alignment of the parts.

In closing, it seems to the writer that test units of the order of 1 000 square feet could give an excellent

estimate of the probable cost of larger units. Experience in this direction must somehow be gained before solar distillation is either abandoned or placed on a firm basis. Surely the few types of construction already advanced to the pilot plant stage do not exhaust the range of possibilities.

### References

1. Hand, I. F., Insolation of clear days, *Heat and Ventilating*, vol. 47, No. 1 (1950), p. 92.
2. Telkes, M., Research on methods for solar distillation. Research and Development Progress Report No. 13, Office of Saline Water, Department of the Interior, Washington, D.C. (1956), 65 pp.
3. Development of plastics solar stills. Bjorksten Research Laboratories, Inc. Research and Development Progress Report No. 24, Office of Saline Water, Department of the Interior, Washington, D.C. (1959), 25 pp.
4. Löf, G. O. G., Design and evaluation of deep-basin, direct solar heated distiller for demineralization of saline water. Office of Saline Water, Department of the Interior, Washington, D.C. (1959), 60 pp.
5. Bloemer, J. W. *et al.*, Field evaluation of solar sea water stills. Saline Water Conversion, Advances in Chemistry Series No. 27, American Chemical Society, Washington, D.C. (1960), pp. 166-177.

### Summary

The study of solar distillation has been carried on experimentally since 1952 by the Sea Water Conversion Project of the University of California. Numerous variations of the simple single-effect solar still have been tested, including several variations of the greenhouse-type with symmetrical glass cover, as well as several inclined-tray units and a mirror-backed unit. The objectives of the tests have been to evaluate the efficiencies and relative costs of the units.

Experimental results are reported for seven units. Four of these were greenhouse-type units with symmetrical glass covers and horizontal water trays; two were flat-type units with inclined water trays; and the remaining one was a greenhouse-type unit with an unsymmetrical glass cover, including a vertical mirror as its north face.

The performance data for clear days only are used in comparing the efficiencies of the several units, since it is argued that cloudy-day data do not fit on the same performance curves as the clear-day data and reflect the local vagaries of weather rather than the true efficiency of the still.

The performance data for the symmetrical greenhouse units are plotted by using co-ordinates of gallons per day (gpd) per square foot of water tray surface. These four units vary in size from about 20 to over 400 square feet of tray area. The production rates for these units are shown to be linear functions of the diurnal solar radiation on a horizontal surface. Maximum production rates for the several stills varied from .09 to .15 gpd per square foot. Efficiencies increased with radiation and reached a maximum of 45 per cent for the best unit.

Clear-day data for the inclined-tray units and for the mirror-backed unit were plotted versus the mid-day angle of solar altitude rather than versus the solar intensity, since the angles of inclination varied and hence the radiation intensity relative to the tray surface would differ from unit to unit. The two flat-type units tested had slopes of 25° and 38° relative to the horizontal. The data when plotted showed the production rates in gpd per square foot to vary with the solar altitude in a non-linear fashion. The unit inclined at 25° showed a production rate increasing continuously with solar altitude along a curved path and reaching a maximum of .15 gpd per square foot. The unit inclined at 38° showed a production rate curve having a maximum point at about 52° solar altitude, at which altitude the sun's rays would be perpendicular to the effective tray surface. The mirror-backed unit showed performance similar to, but less effective than, the 25° inclined tray, its maximum being about .125 gpd per square foot. It should be noted that two of these units were approximately 4' x 8' in outside dimensions, and the third was about 2' x 8'.

When the best performance of the horizontal-tray greenhouse-type units was compared with that of the inclined-tray units, it was noted that the production rate of the horizontal-tray unit approached that of the 25° inclined-tray unit at maximum solar altitude but was appreciably less at all other solar altitudes. It was therefore concluded that, so far as production rates are concerned, the inclined-tray arrangement is superior to the horizontal-tray arrangement. Since the inclined-tray unit consists of a flat box with a flat glass cover the same size as the box, this form of construction involves the

smallest quantity of materials and should be the cheapest to construct.

In closing, it is noted that the costs of solar distillation equipment are presently so high that the product water is more expensive than that produced

using fuel heat. The paper suggests some economies of construction pertaining to the flat-type unit and, it is hoped, may stimulate others to conceive further simplification which could make solar distillation feasible on a large scale.

## RECHERCHES SUR LA DISTILLATION SOLAIRE A L'UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE

### Résumé

On procède à des études expérimentales sur la distillation solaire depuis 1952, dans le cadre du projet de conversion de l'eau de mer qu'exécute l'Université de Californie. On a soumis nombre de variantes du distillateur solaire élémentaire à simple effet, dont plusieurs types sont du genre serre avec couverture symétrique en verre, à une série d'essais, ainsi que plusieurs groupes constitués par des plateaux inclinés, et un autre à surface arrière réfléchissante. Les essais visaient à évaluer les rendements et les prix de revient relatifs de ces dispositifs.

Le présent mémoire donne les résultats expérimentaux pour sept d'entre eux. Quatre de ceux-ci étaient du genre serre avec couverture symétrique en verre et des plateaux horizontaux pour l'eau. Deux autres étaient des appareils plats, avec plateaux à eau inclinés, et le dernier était constitué par une unité du genre serre à couverture asymétrique, comportant un miroir vertical en sa surface nord.

On ne s'est servi que des données sur le rendement pour les jours clairs, dans les comparaisons entre groupes, car on fait remarquer que celles qui ont trait aux jours nuageux ne peuvent pas s'adapter aux mêmes courbes de rendement que celles des jours clairs et représentent les variations locales du temps, plutôt que le rendement véritable de l'appareil.

Les données sur le rendement pour les unités symétriques du genre serre ont été réduites à des graphiques en se servant de coordonnées rapportées au nombre de gallons produits par jour (gpd) et par pied carré de surface de plateau d'eau. Ces quatre unités varient quant à leurs dimensions entre environ 20 et plus de 400 pieds carrés de surface de plateau. Les régimes de production, pour ces unités, ainsi qu'on le démontre, sont des fonctions linéaires de la quantité de rayonnement solaire diurne qui porte sur une surface horizontale. Les régimes, au maximum de production, pour les divers alambics, ont varié de 0,09 à 0,15 gpd par pied carré. Le rendement a augmenté avec le rayonnement et il est passé par un maximum de 45 p. 100 pour le meilleur des groupes.

On a retenu les données applicables à un jour clair pour les installations à plateau incliné et pour le groupe à surface arrière réfléchissante en fonction de la hauteur du soleil à midi, plutôt que de son intensité, étant donné que les angles dont les collecteurs étaient inclinés sur l'horizontale étaient différents, si bien que l'intensité du rayonnement par rapport à

la surface du plateau aurait varié d'un collecteur à l'autre. Les deux éléments du type plat qui ont été soumis aux essais avaient des pentes de 25° et 38° sur l'horizontale. Les données inscrites ont révélé des régimes de production, mesurés en gpd par pied carré, qui variaient avec l'altitude du soleil suivant une fonction non-linéaire. Le groupe incliné à 25° a donné une production qui augmentait continuellement avec l'altitude solaire, suivant une courbe qui passait par un maximum de 0,15 gpd par pied carré. Pour le collecteur incliné à 38°, la courbe du régime de production passait par un maximum à une hauteur de soleil de l'ordre de 52°, pour laquelle les rayons de l'astre étaient perpendiculaires à la surface utile du plateau. L'unité à surface arrière réfléchissante a fonctionné d'une manière analogue, mais avec un moindre rendement que celle qui était inclinée à 25°. Le maximum était alors de 0,125 gpd par pied carré environ. Il convient d'observer que deux de ces groupes avaient des dimensions extérieures de l'ordre de 4 × 8 pieds (1,20 × 2,40 m) tandis que le troisième mesurait environ 2 × 8 pieds (0,61 × 2,40 m).

Quand on a comparé les meilleurs résultats donnés par les dispositifs du type serre à plateau horizontal avec ceux des unités à plateau incliné, on a observé que le régime de production du système horizontal se rapprochait de celui du système à plateau incliné à 25° pour l'altitude solaire maximum, mais qu'il était appréciablement moindre pour toutes les autres. On en a donc conclu que, en ce qui concerne les régimes de production, la disposition à plateau incliné est à préférer au système à plateau horizontal. Étant donné que le système à plateau incliné est constitué par une boîte plate avec un couvercle en verre également plat, ayant les mêmes dimensions que la boîte, ce mode de construction exige moins de matériaux et doit être plus économique à réaliser.

En conclusion, on observe que les frais afférents aux systèmes de distillation solaire sont tellement élevés actuellement que l'eau ainsi produite revient plus cher que celle que l'on distillerait en utilisant la chaleur fournie par un combustible. L'auteur recommande, dans le mémoire, quelques économies de construction ayant trait au système à plateau plat, et on espère que ceci pourra encourager d'autres chercheurs à songer à des simplifications ultérieures susceptibles de permettre la distillation solaire à grande échelle.

## A LARGE SCALE, LOW COST, SOLAR HEAT COLLECTOR AND ITS APPLICATION TO SEA WATER CONVERSION

*Richard L. Hummel\**

The object in developing this solar distillation design was to convert large quantities of sea water to cooled fresh water at a cost low enough to compete favorably both with other methods of sea water conversion, in use or proposed, and with natural fresh water sources. To meet these objectives, a more complex and complete design resulted than is usual for solar distillation. The heat collecting basin, itself, is augmented for greatly increased efficiency by additional surfaces and external equipment to develop multiple effect evaporation as well as the cooled product consumers would require. Costs have been calculated for a system with a one square mile solar heat collecting area located in the huge shallow bay, Laguna Madre, which extends over the southwest coast of Texas. The calculated water costs of between 22 cents to 35 cents/1 000 gallons, for the over-all unit, are almost unbelievably low in view of present experience with sea water conversion systems and especially so in comparison with current solar distillation. The heat collecting basin operating alone should produce water (non-cooled) at a cost low relative to currently operating plants. Further, the costs for either the complete system or, specifically, the basin operating alone, should drop strongly as suitable transparent plastic is improved or made cheap, as its initial and replacement cost is the major item in the annual cost of production for this design.

The object of this paper is to convince you, the experts in solar distillation, that low cost water by solar distillation is both possible and probable, as well as acquainting you with some of the concepts of this system. To best serve the first objective this paper will be largely confined to the heat collecting basin itself and in particular to the details of its fabrication, erection, and maintenance. The thermodynamic details of the whole system have been explored in a previous paper presented at the ACS meeting in March (1), and another paper is being presented at this symposium (2) discussing thermodynamic aspects of the system with particular emphasis on the production of by-product power. The heat collecting basin will be initially developed as a logical improvement on a current, hurricane tested design and the result will be compared in all important aspects of construction and operation<sup>1</sup> in the expectation that

such a comparison will justly be more satisfying and convincing than absolute cost figures which may be suspected of incompleteness and/or undue optimism. To obtain the predicted water costs the design proposed must be a substantial improvement over all current designs in regard to either construction costs and/or maintenance costs and/or operating efficiency.

The comparison still is that designed by Mr. Edlin of duPont (3), erected at Datona Beach, Florida in 1958, and shown in figure 1. It was not chosen as being the best current design,<sup>2</sup> but was chosen as being the most convenient for this development. It consists of a clear plastic film anchored in concrete gutters, supported by air pressure and covering a brine-filled basin which is waterproofed by a black polyethylene film and separated from the ground itself by a few inches of insulation. The width was fixed at roughly three feet, by the fact that the plastic is fabricated in rolls four feet wide. The possible length is unlimited since longitudinal forces do not accumulate over the entire length but are transmitted to the concrete gutters within a few feet. A plastic thickness of three mils was chosen in the expectation that this thickness would survive a hurricane provided that ageing had not decreased the strength by more than half, and that tension could be maintained. The thickness required is a function of the size and shape.

Operationally, the design can operate at over 80 per cent, evaporation efficiency under controlled laboratory conditions of constant high heat flux and relatively still air. (4) The efficiencies in actual operation are considerably lower—exceeding 40 per cent on favorable summer days and dropping quite low during the winter months. This, as Dr. Gomella has observed (5) and as the calculations of Dr. Löf (6) and the writer (1) demonstrate, is due to the fact that operating efficiency is strongly related to operating temperature. The design is sensitive to vapor leakage at the edge seal, will dry condensate back into the brine from the horizontal section particularly during wind vibration, and like most designs suffers some condensate re-evaporation.

To improve upon the design, the first step will be to eliminate or reduce any major costs that can be eliminated or reduced for a one-square-mile basin. The cost of the transparent plastic itself must remain,

\* Institute for Atomic Research, Iowa State University, Ames, Iowa.

<sup>1</sup> This is similar to the mathematical technique of proving theorems by inequalities when direct proof is difficult.

<sup>2</sup> Mr. Edlin has improved on its design partially along lines suggested in this paper.

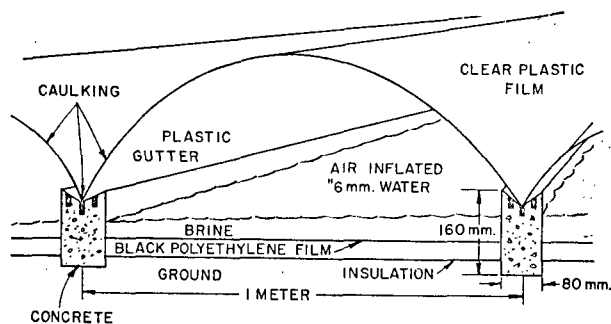


Figure 1. Reference solar still

but in this reference design it is not the major cost. First of all, large scale operation makes the layer of insulation almost useless.<sup>3</sup>

For large basin areas, i.e., one square mile or more, the waterproof ground plastic can be largely dispensed with, provided that the basin operates below mean sea level; but, as the eventual design will very effectively utilize this plastic layer in multiple effect distillation, we shall leave it in the simple heat collecting basin.

The major amortized expense of the reference design can be reduced to quite minor proportions in a design taking advantage of the huge area involved. This expense results from the hand labor of installing and sealing the plastic in the concrete gutters. This labor can be reduced by increasing the width between the gutters and thus reducing the number of gutters and the hand labor by a factor proportional to the width ratio. Single width rolls can no longer be used but must be joined to obtain the greater width. However, the seams may be fabricated mechanically at a cost exceedingly small relative to the cost of the hand labor eliminated. Mr. Edlin has taken a small step in this direction by going to stills eight feet wide but, although a sizable reduction in cost can result, the residue cost of installation remains intolerably large considering that it can be virtually eliminated by using wider stills.

Since the wind forces exerted on the cover depend on the width between the supporting gutters, would not wider unit stills require heavier plastic offsetting the labor savings economically? Not if the plastic were still supported at the same width as before. For this purpose it is proposed that thin steel wires of several tons breaking strength sealed into the seam between rolls of plastic as the seam is mechanically fabricated.<sup>4</sup> If the wire extensions from the seams were attached to the ground at the same three foot spacing as before and placed under a few thousand

<sup>3</sup> Dr. Löf (7) has previously noted that insulation was unnecessary for "constant" temperature stills (deep basin) but detailed calculations (1) show little production effect of insulation for "shallow basin" stills also.

<sup>4</sup> Anyone who has watched his wife sew on a machine may realize that the seamer which can incorporate lace, etc., into the seam is a simple device with no moving parts, and may suspect that incorporation of a wire into a mechanically fabricated plastic seam would add little to the complexity of the fabricator.

pounds tension and the plastic were then supported by the same air pressure as in the reference still, then the wind forces on the surface would be identical to that over a battery of reference stills whether or not the wires were containing seams resting on the ground or were supported horizontally high above the ground. The plastic would form parallel semi-cylinders of the same size and shape as before and the wind would be in contact only with the upper surface. The only difference is that in a cross wind the point of contact between semi-cylinders found by the reinforcing wire seams would curve slightly between supports.

Erected as described, the surface would not direct the condensate to the collecting gutters. It will not be used to collect condensate, but will serve only to absorb the wind forces. Its presence will permit simple installation of a lower condensing cover which may be quite thin and fragile and may cover a basin section 50-100 feet wide. This lower surface will be lightly inflated and need have reinforcing steel wires in seams where they will contribute to erection ease or to providing a sharp apex for improved condensate drainage. The collecting gutter must be enlarged to a trough to handle the increased runoff,<sup>5</sup> but the seal of the edge of the cover to the trough is less critical because of the greatly increased quantity of vapor contained.

Since the upper surface will not handle condensate, it can be streamlined to eliminate the high wind drag of a series of semicylinders. Moving the wires apart to give flat arcs of plastic will greatly reduce the eddies induced, thus reducing the wind force and the plastic thickness required as well as reducing the area of plastic required and the air pressure required for tautness. The limit, a surface stretched flat, would require no air pressure<sup>6</sup> and have only friction drag, but would require a somewhat higher tension to prevent harmful wind flutter since its restoring forces are completely symmetrical to displacement and the surface movement is therefore subject to resonance. The combined tension from high wind drag and tension added to prevent flutter is considerably less for a flat surface than for the hemisphere, but a slightly arched surface may have a lower sum yet and is certainly easier to adjust.

The operating basin would then consist of very long 50' to 100' wide basin sections separated by the collecting troughs and covered by an air and wire supported thin plastic cover. Pairs of concrete pipe supports joined into triangles to straddle the troughs and connected transversely by heavy steel wires under possibly 20 tons' tension will support the lower surface and form transverse supports on which to

<sup>5</sup> Two-foot-diameter transite (an asbestos loaded concrete) half-pipe will be used for the trough but low grade concrete will be dumped in as ballast and to allow formation of a groove for retaining the plastic.

<sup>6</sup> A loss in air pressure due to a power failure resulted in the immediate loss of the reference stills after they had survived half a hurricane.

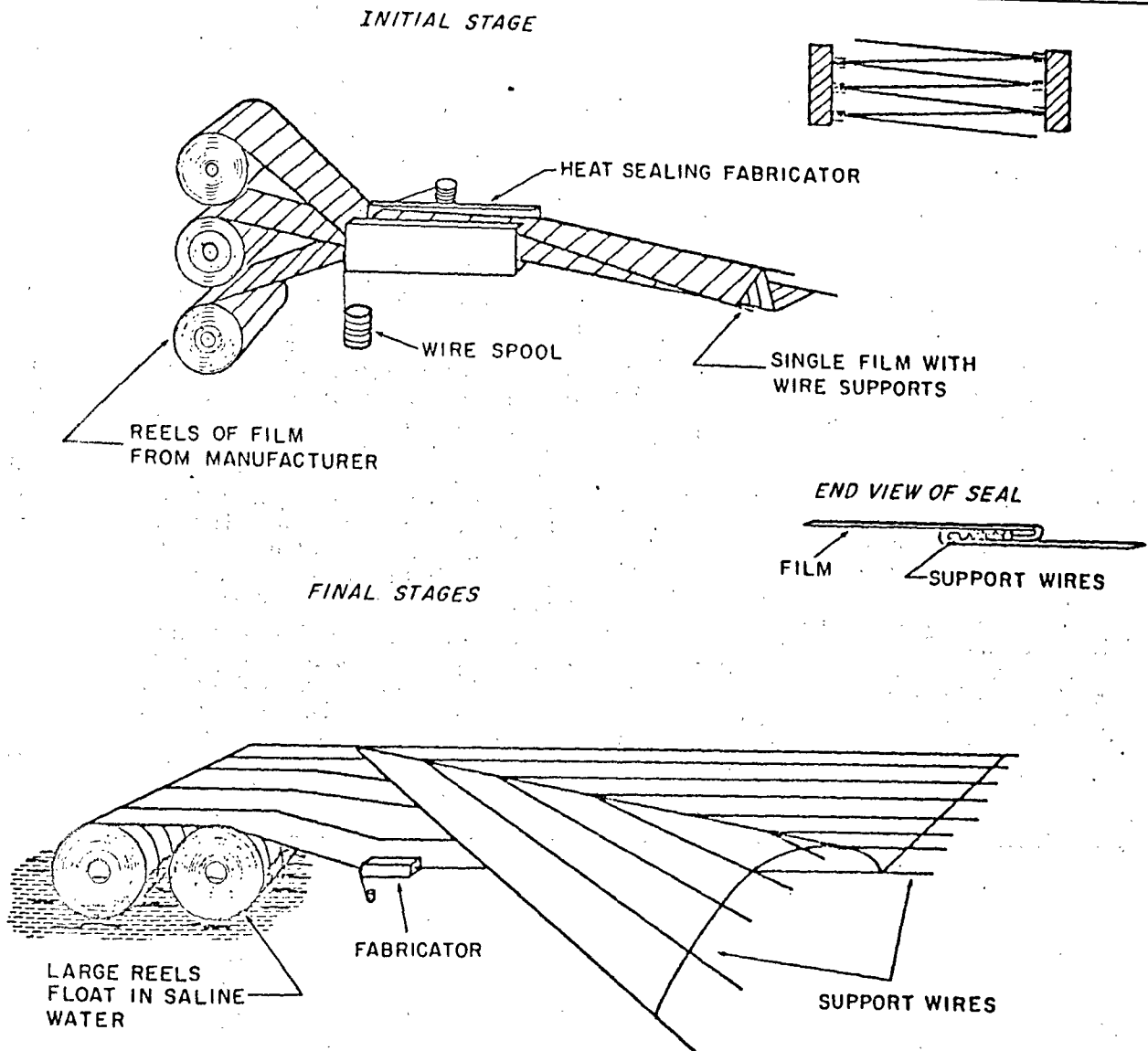


Figure 2. Plastic fabrication

rest the upper surface. Very long panels of convenient width steel wire reinforced panels of plastic will be stretched tautly over this support bed with the edges of the panels overlapped to minimize air transport between the outside winds and the interior. The additional surface will reduce the quantity of radiation which reaches the water, with the consequence that a total loss still (no heat recovered for multiple effect evaporation) of this design cannot reach the 80 per cent efficiency that the single cover still can exceed under laboratory conditions. However, the added resistance of two additional air films to heat conduction and the added resistance of an infrared absorbing surface to radiation more than doubles the  $\Delta T$  required for the heat loss. Consequently the operating temperature will be raised, which will permit a greater retention of laboratory efficiency under actual operating conditions. During the summer a dual cover still may retain an efficiency of almost

60 per cent when a single cover still has dropped to 45 per cent. During the winter a dual cover still may retain 40 per cent efficiency when a single cover still has dropped to 10 per cent. The lower cover also will not be shaken by the wind to lose condensate back into the brine and will have no horizontal segment to hold condensate for such loss or to reflect additional sunlight. Advantages due to the larger size sections include proportionately less vapor leakage, proportionately less area for condensate re-evaporation, and fewer forming drops of condensate to reflect the solar radiation.

But these advantages are minor relative to the question of whether this design costs less to build and maintain. First in this respect let us note the surprising fact that dual covers will most likely require less total weight of plastic rather than more, since the upper surface can be thinner or at least as thin as the previous single surface and considerably

less area will be required, and the lower surface can be quite thin. Let us also note that erection and fabrication of the upper and lower surfaces are comparable with the problems involved for the upper surface panels due to plans to use greater widths for these panels.

As a reliable starting point, the G. T. Schjeldahl Company which fabricated the large balloon satellite "Echo" from Mylar and has fabricated a number of larger plastic structures including their 500' manufacturing plant, has given an estimate of \$3 200-\$3 600 to fabricate for a one-acre pilot plant, a 230' × 230' steel wire reinforced upper cover and four 80' × 200' lower covers from Mylar and to vacuum pack these into rolls for delivery. This includes \$600 for the material cost of their special thermoplastic bonding material, but does not include the costs of the Mylar or wire. A 60' × 60' section to cover the reference still area of 2 300 ft<sup>2</sup> could be thrown up in a few hours by 4 Boy Scouts, if the materials were on site and pedestals for the supports were in place. First two supports on the two sides of the area would be raised erect with the aid of the transverse wire they are to support and the transverse wire anchored tightly at both ends. Then the cover would be unrolled to a flat folded strip with the wires extending the length of the strip. Using rings attached to the extended ends of the wires as handles, the boys would stake the two ends of the outer wire of the lowest panel to the ground and then flip the remaining panels off this panel exposing new wire ends. This

would be repeated 17 times rolling the plastic cover over the support wire until the 34 wire ends had been tightly staked. Then sand would be shovelled to close the edges. A fairly strong wind would cause less trouble to this erection of a surface 60' wide than it would cause to the erection of a four-foot section of the reference design. The man hours involved are probably the same, or less. The lower surface can of course be unfolded in the shelter of the upper regardless of wind conditions and then sealed at the edges and inflated.

The one-acre cover first mentioned would require more supports (12), four times as many Boy Scouts for the increased length and more time because of the increased width, but could be erected in essentially the same manner provided it were not too windy. The entire upper cover wire supports included would weigh roughly 600 pounds. The estimated cost of fabrication and erection for the one acre still excluding materials is less than that expended on the reference stills 1/16 the area. Thus, if better were not possible, the one-square-mile plant could be constructed in 640 one-acre sections at a lower cost than for one square mile of 3' wide sections.

But we are not Boy Scouts erecting a somewhat spectacular tent with limited equipment. We can make full use of our technology and our special situation which especially facilitates the handling of huge plastic surfaces whether rolled up or extended. First of all we are not cramped for space. We have at least one square mile available. Second, we may

Description	Unit price \$	Total cost \$	Amortization %	Annual cost \$
<b>Heat collecting basins</b>				
Land cost . . . . .	100/acre	64 000	7.4	4 736
Land preparation (leveling, troughs, and blackening) . . . . .		2 000 000	7.4	148 000
Pumps and piping . . . . .		200 000	7.4	14 800
Mylar W1 28 000 000 ft <sup>2</sup> , 201 000 lb. . . . .	3.85/lb	773 850	31.3	242 215
Mylar 28 000 000 ft <sup>2</sup> , 201 000 lb. . . . .	1.60/lb	321 600	31.3	100 661
Mylar 42 000 000 ft <sup>2</sup> , 301 000 lb. . . . .	1.60/lb	483 000	31.3	151 242
Steel 2 500 000 lb. . . . .	0.12/lb	300 000	31.3	94 000
Concrete 1 000 cu.yds. . . . .	80/cu.yds.	80 000	7.4	6 000
Fabrication unit. . . . .		250 000	7.4	18 500
Labor (equipped) : 100 man months . . . . .		200 000	31.3	62 400
<b>Operating costs</b>				
Labor . . . . .				50 000
Power and maintenance . . . . .				50 000
Single effect operation . . . . .		4 672 450		985 178
Water production 4 100 000 gal/day . . . . .				
1 353 000 000 gal/year (330 days) . . . . .				
				Unit cost = 73 cents/1 000 gal
<b>Multiple effect evaporation</b>				
Black plastic 56 000 000 ft <sup>2</sup> , 402 000 lb . . . . .		643 200	17.0	109 344
Water storage 50 000 000 gals . . . . .		1 000 000	7.4	74 000
Additional pumps and blowers . . . . .		700 000	12.0	84 000
Vapor reheat system. . . . .		500 000	7.4	37 000
Cooling system . . . . .		700 000	7.4	51 000
Additional power and maintenance. . . . .				75 000
Multiple effect evaporation . . . . .		8 215 650		1,416 322
Water production 14 500 000 gal/day . . . . .				
4 785 000 000 gal/year . . . . .				
				Unit cost = 29 cents/1 000 gal

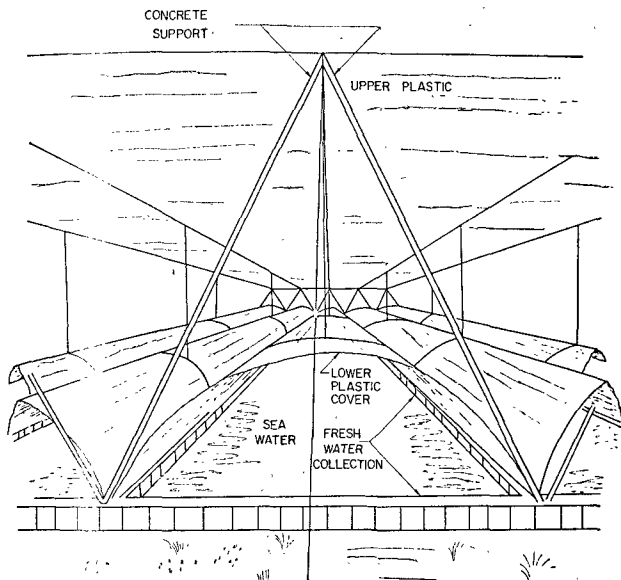


Figure 3. Proposed heat collecting basin

have the pumps and the construction up to allow the area to be flooded with sea water if it is not already so flooded. Water makes an ideal support for the handling of the plastic. Extended sheets of any size will slide smoothly over its surface with no chance for abrasion while the water will hold the thinnest film flat and out of the grasp of the wind. If massive rolls are to be handled, their entrapped air will permit the water to support them without any need for massive frames, axles and equipment. Taking advantage of this, Hummel and Rudd (8) discuss the fabrication and erection of an upper surface in sections  $\frac{1}{4}$ -mile wide and 1 mile long, although in fact the length is immaterial. Special fabricating machines are used to form the sheet in two passes with the first pass forming a section wide enough to be used for lower covers. The fabrication and erection of a complete plant is estimated to require but 60 man months, with the

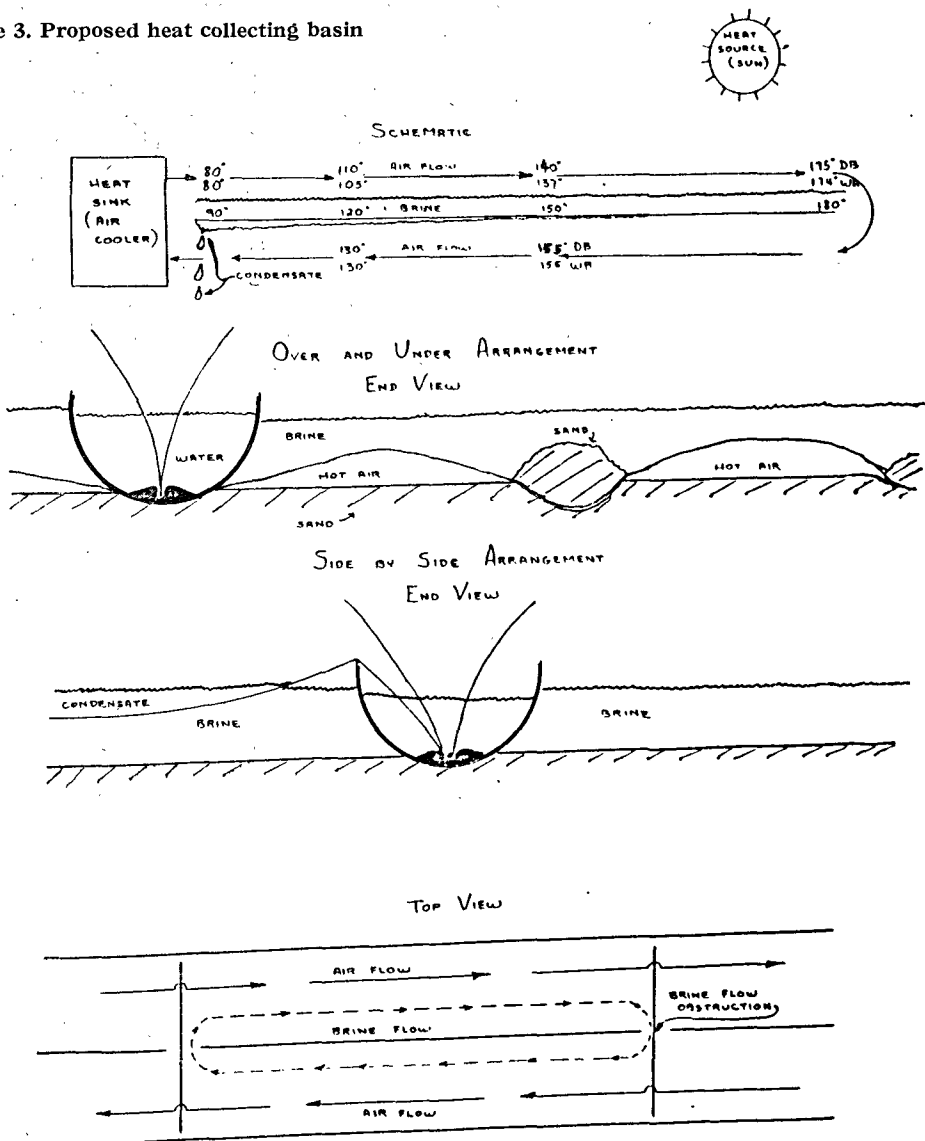


Figure 4. Multiple effect operation

special fabricating machines costing \$250 000.<sup>7</sup> The addenda of this paper covering cost estimate follow.

In conclusion, compare the reference and proposed system for a total coverage of one square mile. The land costs are the same. The material costs of the covers are roughly the same with the proposed system—probably cheaper. The troughs for the proposed system definitely cost less. The fabrication and erection should cost a great deal less for the proposed system. The black waterproofing plastic may cost more in the proposed system because the operating temperatures will be higher, but its fabrication and installation should cost less. Insulation has been eliminated. Inspection will be more difficult for the proposed design, but should matter less. Heat will be a problem and an expense during the erection of the lower surface under the upper for the proposed system but wind should matter less in general.

Minor repairs to the plastic surface will be more difficult for the proposed system than for the reference system because the upper surface will be high and without any means of direct access. A rip of any dimension in the upper surface would be repaired by passing a mile-long reinforced panel of appropriate width over the surface and anchoring it to cover the hole. The panel or a guide wire could be slipped up from the side. Small rips will not generally occur except when something is thrown through the surface and the large size of either system should limit this to the periphery. A rip occurring during a high wind will quickly whip through the entire length of the panel for either system and in the reference

<sup>7</sup> The machine and the operation has been discussed in detail with the G. T. Schjeldahl Company personnel and, although they brought up several additional aspects (such as the need to preprocess the Mylar rolls to replace duPont splices with a thermoplastic bond), they ended in general agreement with the cost and time estimates.

system this may relieve the air pressure and cause the remaining panels to go also. A large rip probably costs a comparable amount for both systems if the reference system uses long cells. Extensive repairs for the reference system would cost more than complete replacement for the proposed system.

It is necessary for maximum efficiency that the transparent surfaces remain clean and clear and that the black surface remain free of deposit. Present experience is that rain keeps the top surface reasonably clean in most locations and that deposits need not occur if the degree of concentration is limited.

Operationally the proposed design should produce a bit more water especially in winter even in a total loss version, and this becomes much more when multiple effect operation is added. Figure 3 shows multiple effect operation and figure 4 is a table giving estimated costs for water produced by total loss and multiple effect versions. More detail was given in an earlier paper (1). The product water from the total loss version proposed still is less desirable than that of the reference still for drinking because of its higher temperature. This defect is not shared by the complete system which supplies cooled water and could market hot water also as a by-product. Another by-product which should be considered for any system of large output is salt products. That these must pay in some cases can be easily proven by considering locating the still by a location now producing salts by solar evaporation. Feeding this evaporator with a concentrated brine would permit it to produce more salt in less area reducing its handling and possibly purification problems. The writer's feeling that the prospects are better than this are given in the table showing the cost estimate, above.

## References

1. Hummel, R. L., New Concepts in Solar Stills Leading to Low Cost Water from Sea Water, presented at the St. Louis meeting, A.C.S., March, 1961.
2. Hummel, R. L., Power as a By-Product of Competitive Solar Distillation, *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy*, 1961, vol. 4, agenda item II.C.1, paper S/15.
3. Edlin, F. E., a paper presented at C.N.R.S. meeting on solar energy, Mont-Louis, France, June, 1958.
4. Edlin, F. E., Private communication to the author.
5. Gomella, C., Solar Distillation Developments in the Easter, Mediterranean, Symposium on Saline Water Conversion 568, 131, November, 1958.
6. Eibling, J. A., and Löf, G. O. G., Energy Balances in Solar Distillers, presented at the Washington meeting A.I.Ch.E., December, 1960.
7. Löf, G. O. G., Design and Cost Factors of Large Basin-Type Solar Stills, Symposium on Saline Water Conversion, 568, 157, November, 1958.

## Summary

It is proposed that a multiple layer, transparent cover of steel wire reinforced plastic film can be mechanically fabricated and erected in very huge sections and at very low per area cost by the use of a

flooded basin of large dimension to provide water support and control of the huge sheets during fabrication and erection. The wind cannot pick up and whip to pieces a plastic surface that is resting upon



and is wetted by water.<sup>1</sup> As a huge area capable of being flooded and the means for flooding it with sea water are necessary prerequisites to large scale solar distillation, it is suggested that solar stills can be thus constructed to convert sea water to fresh at a relatively low cost. The design and operation of such a solar still are discussed.

It is not necessary, however, to go to a large scale plant or to use the specialized fabrication and erection techniques in order to obtain a considerable advantage in cost and operation from the design itself. Therefore a small scale plant erected in standard circus technique with prefabricated surfaces<sup>2</sup> is also discussed since the factors involved are more familiar. To give the best idea of the advantages, disadvantages, and their magnitude compared with more conventional approaches, the design presented was compared throughout and in detail with a familiar and tested design for plastic surfaces.

The large scale version of the solar would cover one square mile. It would consist of black bottomed basins 50' to 100' wide and on the order of 1 mile long (increasing the length presents no problems) which are separated by half-pipe condensate collecting troughs and first covered by a flimsy condensing cover (referred to as the lower cover). An upper cover extends over the entire area (protecting the lower cover completely from contact with outside winds), is dual layered and is stretched taut and reasonably

<sup>1</sup> Wetting an undersurface by bulk water removes two interfaces and adds but one, and is the rule for plastics while wetting an upper surface by spreading is the exception since it adds two interfaces and removes but one.

<sup>2</sup> G. T. Schjeldahl, fabricators of the sateloon "Echo" have estimated their fabrication costs for the reinforced surfaces for a 1-acre plant.

flat by the steel reinforcing wires which are placed every four feet and which also serve as spacers between layers. The upper surface is composed of panels roughly 1 mile long (again length presents no problem) and as wide as possible. Overlapping edges of the plastic are expected to provide an adequate seal. A smaller unit (down to 50' wide) would have the unit basin width and the lower cover width the same as before with fewer and shorter basins, because the biggest cost improvement comes from having fewer basin edges to hand seal.

The following comparisons between the proposed design and the reference design were proposed for all sizes of still from large to 50' x 50', but usually go to extremes for the large size. (1) The labor costs of installation are much less for the proposed still. (These costs are the largest single cost for the reference design.) (2) The material cost of the plastic is roughly the same for both designs. (A relatively flat wind-exposed surface has less surface and less wind drag.) (3) Both designs can survive hurricanes but the reference design will go if air pressure is stopped or released. (4) Minor repairs will be more costly for the proposed design but not excessively difficult. (5) The proposed design passes less solar radiation to the water but its higher operating temperature uses the energy more efficiently. As a result the reference still produces more at very high radiant fluxes, but less at normal operating conditions. (6) The higher operating temperatures of the proposed design make multiple-effect evaporation with recovered heat feasible.

The last and most important comparison is that unit water costs for the large scale still of \$0.60 to \$0.80/1 000 gal. can be seriously put forward for the proposed design while current designs must estimate much higher costs. Further, with multiple-effect evaporation added, the figure drops to \$0.30/1 000 gal.

## UN COLLECTEUR DE CHALEUR SOLAIRE DE GRANDES DIMENSIONS ET DE PRIX MODIQUE; SON APPLICATION A LA CONVERSION DE L'EAU DE MER EN EAU DOUCE

### Résumé

On propose la fabrication mécanique d'une pellicule de composition plastique transparente, faite de plusieurs couches et renforcée par du fil d'acier, ainsi que son montage en panneaux gigantesques à un coût très modique par unité de surface, en se servant d'un vaste bassin plein d'eau qui jouerait le rôle de support à ces énormes feuilles et les tiendrait en place pendant leur pose. Le vent ne peut pas enlever une surface de composition plastique et la déchiqueter si elle repose sur de l'eau qui, en même temps, la mouille.<sup>1</sup> Pour autant qu'une énorme surface suscep-

tible d'être inondée et les moyens de la couvrir ainsi d'eau de mer sont des conditions préliminaires nécessaires à toute entreprise de distillation solaire à grande échelle, on suggère que des bassins de distillation solaire peuvent être construits de la sorte pour convertir l'eau de mer en eau douce dans des conditions relativement économiques. On examine la conception et le mode de fonctionnement d'un semblable alambic solaire.

Point n'est besoin, cependant, de s'en remettre à une installation de grande envergure ou de faire appel à des techniques spéciales de fabrication et de montage pour réaliser un avantage considérable sur le plan des frais de première installation et celui de l'exploitation quotidienne, grâce à la conception même d'une telle distillerie solaire. On examine donc

<sup>1</sup> Le fait de mouiller une surface inférieure par une masse d'eau élimine deux interfaces et n'en ajoute qu'une, et est de règle pour les composés plastiques, tandis que le fait de mouiller une surface supérieure est exceptionnel, puisqu'il ajoute deux interfaces et n'en élimine qu'une seule.

également le cas d'une installation à petite échelle disposée de la manière circulaire classique avec des surfaces préfabriquées,<sup>2</sup> car les intéressés sont bien familiarisés avec les éléments en cause sur la base de l'expérience acquise avec les distillateurs solaires. Pour faciliter au maximum l'appréciation des avantages et des inconvénients du système proposé, ainsi que leur importance, quand on les rapproche des méthodes plus classiques, on a procédé à une comparaison complète et détaillée du projet soumis à une technique de réalisation et de fabrication des surfaces en composition plastique connue et éprouvée.

La version à grande échelle du distillateur solaire occuperait une surface d'un mille carré (2,56 km<sup>2</sup>). Elle serait constituée par des bassins à fond noirci de 50 à 100 pieds de large (15 à 30 m) sur une longueur de l'ordre du mille (1 600 m) (l'augmentation de la longueur ne soulève pas de problème), séparés par des auges de condensation en forme de demi-conduit et recouverts, en premier lieu, par une mince couverture de condensation (appelée couverture inférieure). Une couverture supérieure s'étend sur toute la surface (protégeant donc complètement la couverture inférieure de tout contact avec les vents extérieurs). Elle est réalisée en deux couches, tendue et maintenue raisonnablement plate par les fils de renfort en acier convenablement disposés tous les quatre pieds (1,2 m), lesquels jouent ainsi également le rôle d'entretoises entre ces deux couches. La couverture supérieure est faite de panneaux d'une longueur d'environ 1 600 m (là encore, la longueur ne soulève pas de problème) et aussi larges que possible. On prévoit que le recouvrement des bords de la substance plastique constituera un joint suffisamment étanche. Une unité plus petite (dont la largeur ne dépasserait pas 50 pieds, ou 15 m) présenterait la même largeur que le bassin élémentaire et la largeur de la couverture inférieure serait la même que dans le cas précédent avec des bassins plus courts et moins nombreux, pour autant que la compression de frais la plus impor-

tante réside dans la réduction du nombre de bords de bassins sur lesquels il faut faire des joints étanches à la main.

Les comparaisons qui suivent entre la formule projetée et la conception prise comme terme de référence ont été suggérées pour toutes les tailles d'évaporateurs ou distillateurs, depuis les plus grands jusqu'à 50 pieds sur 50, mais elles donnent habituellement des résultats extrêmes pour les grandes tailles. 1) Les frais de main-d'œuvre afférents à l'installation sont bien moindres pour le distillateur proposé (ils constituent le plus gros poste pour le projet pris comme terme de comparaison). 2) Les frais afférents aux matériaux plastiques sont à peu près les mêmes pour les deux formules (un panneau exposé au soleil et relativement plat a une surface moindre que celle des autres formes et offre moins de prise au vent). 3) Les deux techniques sont à l'épreuve des ouragans, mais celle que représente le terme de comparaison sera détruite si la pression d'air tombe ou si cet air s'échappe. 4) Les petites réparations seront plus coûteuses, avec le projet soumis, que dans le cas auquel on le compare, mais pas d'une difficulté excessive. 5) La formule projetée transmet moins de radiation solaire à l'eau, mais les températures de fonctionnement plus élevées qu'elle autorise assurent une utilisation plus efficace de l'énergie. En conséquence, le distillateur choisi comme terme de comparaison produit davantage que l'autre lorsque les flux de rayonnement sont très grands, mais moins dans les conditions de fonctionnement normales. 6) Les températures d'exploitation plus élevées qu'envisage la réalisation proposée permettent la construction d'évaporateurs à multiple effet avec récupération de chaleur.

La dernière comparaison, qui est également la plus importante, réside dans le fait que des prix de revient compris entre 0,60 et 0,80 dollar les mille gallons (prix unitaires) pour le distillateur de grandes dimensions peuvent être sérieusement envisagés, tandis que les modalités actuelles doivent envisager des prix de revient beaucoup plus élevés. Si on ajoute l'évaporation à multiple effet, le chiffre tombe à 0,30 dollar par mille gallons.

<sup>2</sup> La maison G. T. Schjeldahl, fabricante du ballon satellite « Echo », a évalué les frais de fabrication des surfaces renforcées pour une installation couvrant un acre ou 0,4 hectare.

## EXPERIMENTS ON DEMINERALISATION OF WATER IN NORTH INDIA

*M. L. Khanna \* and K. N. Mathur \*\**

In certain parts of India, particularly the north-western semi-arid region of Rajasthan desert, the sub-soil water is brackish and unfit for drinking. Trial borings made in this area show existence of sub-soil water at many places at depths ranging from 40 feet to a few hundred feet. With some exceptions much of the water-bearing strata contain water with a fairly high mineral content making it unfit either for drinking or for irrigation. The Rajasthan region offers vast scope for utilisation of solar energy for purposes of demineralisation, and the economical conversion of saline water offers a challenge to solar scientists. The conditions here are almost ideal from the point of view of solar conversion since the region has bright sunshine for most of the year, and the sun angle is high.

Though the use of sun's energy for distillation of water eliminates the cost of fuel, the first cost of installation may be excessive and together with the maintenance costs the whole scheme may be wholly unremunerative even for the limited purpose of providing drinking water for men and animals, let alone irrigation.

Various methods and devices have been tried to make solar distillation processes more compact and less expensive to install and in this connection reference may be made to the work of Maria Telkes (1) particularly regarding the wick type distillation units, whose higher efficiency holds out promise of much wider use once the basic problems of a suitable wick material and of means of keeping it wet are satisfactorily solved.

Keeping in view the vast scope for practical utilisation of solar energy for distillation, it was decided to obtain some data on the conventional types of distillation units. In the conventional type of still, saline water is contained in a shallow metal basin with blackened surface resting on some insulating material. Above this basin, sloping transparent glass surfaces are provided. These surfaces slope downwards into small channels at the sides along the length of the basin. Suitable pipe connections are provided to fill the basins with saline water and to drain out fresh water. The two side channels in which the condensed water flows are given a little slope to allow the distilled water to drain and collect in suitable containers.

In operation, solar energy is absorbed on the blackened bottom of the metal basin which is thus

warmed and the evaporation of the warm saline water saturates the enclosed space. The vapour condenses on the sloping glass plates (which are kept somewhat cooler by the outside air draughts) and condensed water flows down to collect in the channels provided. The depth of water in the basin is usually kept about an inch or so. As a variant on this conventional design, some workers in the USA have employed deep troughs about a foot or so in depth. This construction has the merit that the troughs can be built right on the ground without any insulation. Since a considerable quantity of water is warmed up, the distillation process continues by night also. G. Lóf (2) has carefully compared the efficiency of the deep and shallow types and has come to the conclusion that the two efficiencies are about the same, though the distillation process goes on more uniformly over a 24-hour period in the deep basin type. Lóf estimates the utilisation efficiency in either case to be about 50 per cent. Experiments made mostly in the USA have been directed towards cheapening the cost of construction. Use has been made of plastic sheets for lining the sides of the basin and also replacing glass sheets on the top. Thus, a trough can be formed on the ground itself and lined with a thin black film of a material like polyethylene. The top glass could be replaced by a transparent film of a polyester like Mylar which has proved to be quite durable.

A type of distiller used by Maria Telkes (1) employs a tilted basin in which the saline water is retained in a porous fabric. Means are provided to feed the saline water slowly at the top. The tilted surface facing south and orientated at the correct angle can gain much more heat than a horizontal surface and has been found to be more effective.

Though the use of plastic materials appears to be simple (3), yet the economy of its use remains to be seen. Plastic cover material suffers from two important disadvantages. Firstly, since the surface is not wetted, condensation of water takes place in droplets and these instead of coalescing and running down in a stream, as on glass, continue to grow until they drop down by weight. The droplets act as lenses of very small focal length and thereby cut off a considerable portion of solar radiation with consequent fall in efficiency. A second effect is that the plastic material is more easily scratched by dust particles than glass and in areas subject to dust storms the ground glass effect caused by the abrasive action of the dust particles can reduce efficiency to a very considerable extent. Again in

\* National Physical Laboratory of India, New Delhi.

\*\* Central Scientific Instruments Organisation, New Delhi.

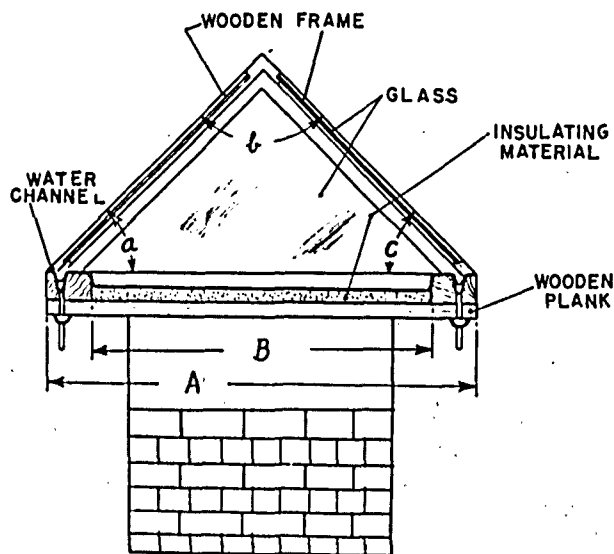


Figure 1. Side view of solar still dimensions :

$A = 4 \text{ ft } 2 \text{ in}$ ,  $B = 3 \text{ ft } 8 \text{ in}$ ;  $a = c = 15^\circ$  and  $b = 150^\circ$

areas subject to high winds and storms, the plastic material is liable to be torn off. In our experiments, therefore, we have preferred to use the conventional arrangement which has the virtue of long life and low maintenance costs. The question of the orientation of the stills is also of some importance and we have tried to investigate if there is any marked effect of orientation on the field of distilled water. For this purpose, the stills were arranged with their lengths along east-west and along north-south directions. Experiments are in progress and no conclusive results have yet been obtained. However, if a number of units have to be arranged in rows, then the rows should preferably

run north-south, since the sun, in this arrangement, will not be obstructed by shadows of one row falling on the other. Also, since the prevailing winds in Delhi are mainly east-west, it follows that in rows running north-south the glasses will offer more surface to the wind than the east-west orientation and thus may produce somewhat greater cooling effect on the glass and hence greater condensation of vapour.

### Construction of the stills

The framework was constructed as shown in figure 1 from ordinary cheap wood and installed on a masonry platform. The metal basin measuring  $8' \times 3' 8'' \times 1\frac{1}{2}''$  deep was made out of galvanised iron sheet and was painted black with a bituminous paint. Two inches of sawdust was used as insulation for the tray. For collecting distilled water sheet zinc was used for making channels.

One filling of water in the tray could last for three to four days. The tray was only cleaned as needed. In any commercial unit an automatic arrangement for cleaning and refilling of trays will have to be employed. Figure 2 shows a photograph of a solar still.

### Observations

The data accumulated over a year are given in table 1 in which the daily output has been averaged over each month. It will be seen from the curve in figure 3 that while there are appreciable variations in the volume of water collected each day, the monthly average values give a fair idea of the output of distilled water. The variations in day-to-day output arise no doubt from change in the weather conditions such as clouds, haze or dust in the atmosphere, the ambient temperature and the velocity

Table 1. Showing average daily output of solar distilled water in gallons per sq ft per day monthwise in a year of 1959-60. Figures in parentheses show litres per sq m per day

Direction of still	Month											
	Jan.	Feb.	March	April	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Long side placed north-south . . .	.028 (1.34)	.037 (1.80)	.040 (1.93)	.054 (2.60)	.059 (2.85)	.057 (2.75)	.058 (2.80)	.060 (2.90)	.061 (2.97)	.055 (2.67)	— (—)	.029 (1.41)

Table 2. Chemical analysis of samples of water used for distillation and of the distilled water collected

	River water	Sub-soil water from a tube-well	Solar distilled water
pH . . . . .	7.3	7.4	6.3
Conductivity in dionic units at 33°C. . . . .	357	2 857	17.8
Total solids, ppm . . . . .	181	1 706	10.8
Iron, ppm . . . . .	8	12	4.0
Other metals tested . . . . .	—	—	Zn, Cu, Sn absent

and direction of wind. Table I shows that these variations are largely cancelled out if we consider the monthly averages.

It would appear that with the advent of summer months, i.e., beginning with March, the output of distilled water begins to show an appreciable increase. The output during the five months May to September remains at a fairly constant high value which is almost twice the output of the winter months December and January. This is a very satisfactory feature since the requirement of water by any community will be the highest during the summer months. It may also be remarked that the output does not seem to show any marked diminution during the monsoon months.

From the data presented, the maximum output is seen to be about .058 to .060 gallons per sq ft per day, i.e., it will require approximately 18 to 20 sq ft of distilling area to yield a gallon of solar distilled water. If we take a community of 100 people for a small village, the minimum daily requirement of water will be about 500 gallons taken at a rather meagre figure of 5 gallons per head of population. To obtain this quantity of water, the distilling area needed comes to 10 000 sq ft. If a distilling unit is made  $2\frac{1}{2}$  ft wide and we separate each row by a distance of  $2\frac{1}{2}$  ft, it will be seen that a total ground area of one acre will yield about 1 300 gallons of water per day. It may be possible to somewhat reduce the separation between the rows and thus to obtain a daily yield of up to 1 500 gallons per acre. This quantity of water at the rate of consumption of 5 gallons per head will be able to maintain a village community of 300 people or 250 people with 40 to 50 heads of cattle.

It is not possible at this stage to estimate the cost of an installation of this magnitude. So much will, in any case, depend upon the location. There are many remote areas in Rajasthan, where the water situation is extremely acute and the only supply available is what is delivered by the cameleer who bring it in leather bags from distant sources: In our

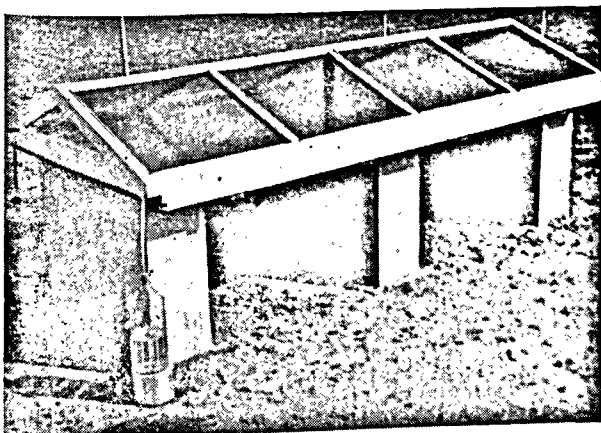


Figure 2. Photograph of a solar still

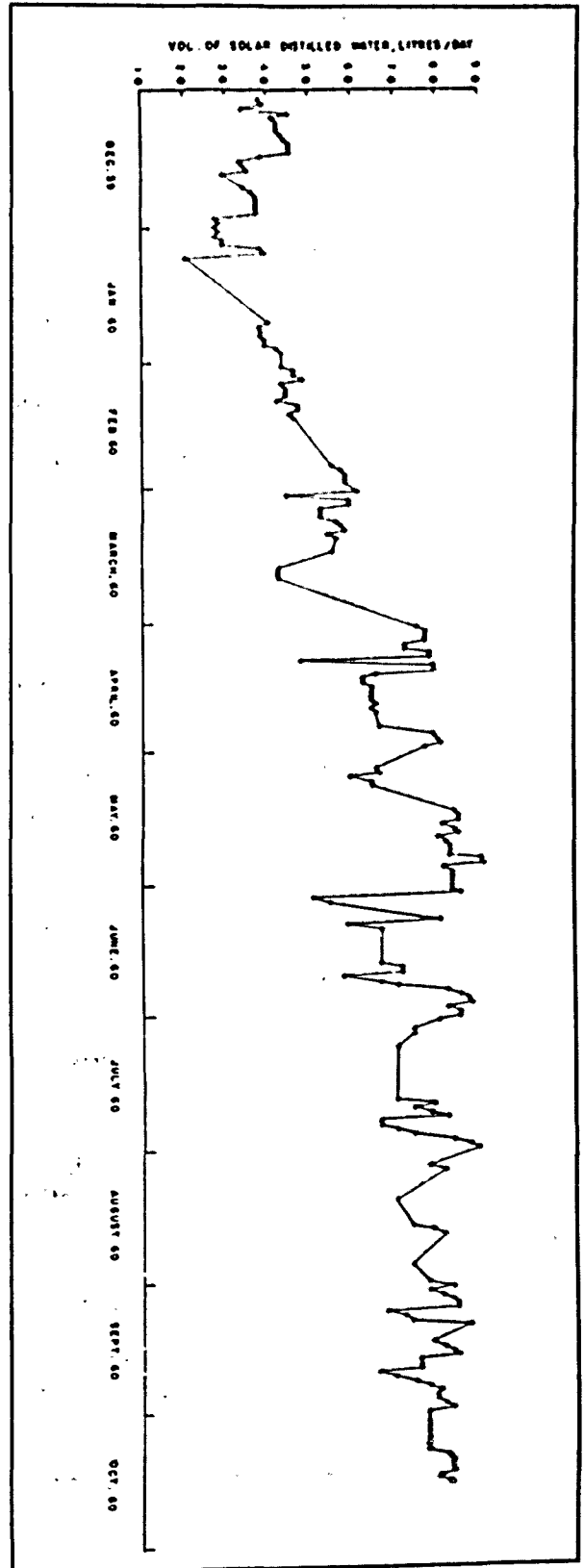


Figure 3. Curve showing record of daily output of a solar still in gallons of water per day (1959-60)

estimate of requirement we have taken a figure of 5 gallons per head. For remote areas, situated at large distance from potable water supply sources, it may be safe to reckon the daily demand of drinking water at a lower figure of  $2\frac{1}{2}$  gallons per head, which will require only half an acre of installation, thereby reducing the first cost to half the amount. On a very rough calculation the cost of installation works out at Rs. 4/- per sq ft. If a large area is to be covered we may take a figure of Rs. 2/- per sq ft as a workable minimum. Thus a distilling area of 10 000 sq ft will cost Rs. 20 000 exclusive of cost of land. This we reckoned will suffice for a village community of 100 people at 5 gallons per head or 200 people at  $2\frac{1}{2}$  gallons per head. It is presumed that the unit will be erected near the source of supply which may be an open well. Some means will have to be found for drawing this water from the open wells or tube-wells. In areas not supplied by electricity, a small pump worked by a 5 hp diesel engine will fully meet the needs.

In Table 2 is given the chemical analysis of samples of water used for distillation and of the

distilled water collected. Improvements in still construction are under way so that solar distilled water may be able to meet the Indian Standards Specifications for distilled water.

### Conclusions

It appears from the foregoing that a solar still installation is a practical proposition for remote arid areas having no potable water supply but having a sub-soil supply of brackish water. Since the needs of such communities are exclusively for drinking and cooking purposes for themselves and for drinking purposes for their draught cattle, a solar installation can bring much relief. The somewhat high first installation cost will be to a fair extent compensated by the low working costs. However, before a large scale experiment is conducted, it will be difficult to be certain of the full economic implications. However, the benefit it may give to remote village communities in arid areas impels the scheme to be given a trial on human considerations alone.

### References

1. Telkes, M., *Ind. Eng. Chem.*, 45, 1108, 1953; Proc. World Symp. Applied Solar Energy, Phoenix, Ariz., 1955, pp. 73-79; Proc. Symp. Saline Water Conversion, Washington, D.C., 1957, pp. 137-149; Res. & Dev. Progs. Rept. No. 13 for Office of Saline Water, Dec. 1956, p. 63.
2. Löf, G. O. G., Proc. Symp. on Saline Water Conversion, Washington, D.C., 1957, pp. 157-174; *Journ. Am. Water Works Assoc.* 52, 578-84, 1960.
3. Heilhy, J. T. and Daniels, F., Solar Energy Research, Editors Daniels, Farrington & Duffie, John, A., Madison, Univ. of Wisconsin, 1955, pp. 125-26; Salam, E. and Daniels, F., *Solar Energy*, 3 (1), pp. 19-22, Jan. 1959.

### Summary

The semi-arid region of Rajasthan offers vast scope for utilisation of solar energy for purposes of demineralization of saline or brackish water. Conditions are almost ideal since the region has bright sunshine for most of the year and the sun angle is high.

Experimental results of extended observations made on distillation of brackish sub-soil water from a tube-well using a solar still are presented. One set of observations extending over a year were made on a conventional type of solar still made from such commonly available materials such as galvanized iron sheets for making troughs, ordinary window glass fitted in a frame of cheap wood and sawdust

and rock wool as insulating materials. Experiments with this still, with its long side placed east-west and north-south, are in progress.

Beginning with March, the output of fresh water shows an increase. During the summer months the output remains at a fairly constant high value of 0.058 gal. per day per sq ft (2.8 litres per day per sq m). This is satisfactory because the water requirements of any community are the highest during these summer months. The output of fresh water has been discussed in relation to a village community of 100 people with water requirements of 5 and  $2\frac{1}{2}$  gallons per head.

## EXPÉRIENCES SUR LA DÉMINÉRALISATION DE L'EAU EN INDE SEPTENTRIONALE

### Résumé

Le Rajasthan, région semi-aride, offre de vastes possibilités pour l'utilisation de l'énergie solaire à la déminéralisation des eaux salines ou saumâtres.

Les conditions y sont presque idéales car, dans cette région, le soleil est brillant pendant la majorité de l'année et monte haut dans le ciel.

Les résultats expérimentaux obtenus à la suite d'observations prolongées faites sur la distillation des eaux saumâtres du sous-sol fournies par un puits tubulaire faisant usage d'un alambic solaire sont décrits dans le présent mémoire. Une série d'observations faites au cours d'une année portent sur un type classique d'alambic solaire construit avec des matériaux d'emploi commun tels que des tôles galvanisées pour les auges, du verre à vitre ordinaire dans un cadre fait d'un bois peu coûteux et de la sciure de bois et de la laine minérale comme produits isolants. Les expériences avec cet alambic, dont le

côté le plus long a été orienté est-ouest et nord-sud, sont en cours.

A commencer en mars, le débit d'eau douce est en augmentation. Pendant les mois d'été, il reste à un niveau élevé relativement constant de 0,058 gallon par jour et par pied carré (2,8 litres par jour et par mètre carré). Cet état de choses est satisfaisant, en ce sens que les besoins d'eau de toute communauté passent par un maximum pendant ces mois d'été. Le débit d'eau douce a été examiné pour une communauté rurale (un village) comptant 100 personnes, dont les besoins d'eau sont de 5 et 2,5 gallons par tête.

## ENTARTRAGE ET INCRUSTATION DANS LES DISTILLATEURS SOLAIRES

G. Lejeune \*

La distillation des eaux saumâtres ou de l'eau de mer au moyen de l'énergie solaire est un des problèmes les plus importants que pose l'exploitation des zones arides, qui sont généralement très ensoleillées. Encore faut-il que les appareils utilisés soient de construction extrêmement simple et bon marché, qu'ils puissent fonctionner avec un minimum de surveillance, et que leur entretien soit aisé.

L'Institut de l'énergie solaire de l'Université d'Alger, qui s'intéresse plus spécialement au développement des régions sahariennes où l'utilisation du rayonnement solaire peut se faire dans les meilleures conditions, a constitué une unité de recherches particulièrement orientée vers les problèmes de distillation des eaux saumâtres qui se trouvent en quantités relativement abondantes en de nombreux points du Sahara.

Les appareils de distillation du type serre résolvent le problème, mais à relativement petite échelle. Ils n'en présentent pas moins un très grand intérêt, car ils permettent la production de l'eau de boisson pour les petits groupes humains qui sont obligés de vivre dans les postes éloignés : postes météorologiques, missions de prospection géologique, postes militaires, etc. Leur rusticité et leur exploitation facile sont une condition essentielle à leur succès; or l'expérience montre qu'ils s'entartrent très rapidement, avec formation d'incrustations très dures, et leur nettoyage se fait avec beaucoup de difficultés.

L'utilisation des eaux saumâtres dans les distillateurs solaires amène, en effet, au cours de l'évaporation, la précipitation des sels peu solubles comme le sulfate de calcium, ou instables comme les bicarbonates.

Si une installation industrielle à gros débit peut se permettre un service de traitement préalable des eaux, les appareils de distillation solaire, prévus pour une petite production d'eau d'alimentation humaine dans les lieux désertiques, posent le problème d'une manière bien différente :

a) Il n'existe généralement pas de technicien averti pouvant faire une correction complète demandant une installation qui n'est plus rentable à cette échelle;

b) La caractéristique des eaux désertiques est d'être non des eaux très chargées en chlorures solubles, comme c'est le cas de l'eau de mer, mais au contraire des eaux sulfatées pratiquement saturées

en sulfate de chaux. Celui-ci se dépose dès que la concentration se produit en donnant un dépôt cristallisé adhérent très difficile à éliminer par la suite sans avoir recours à un démontage de l'appareil, ce qui est souvent très délicat.

Ceci nous a conduit à rechercher une méthode de traitement simple ayant pour but d'éliminer le sulfate de chaux tout en respectant les normes de potabilité : précipitation des sulfates par le chlorure de baryum, et contrôle de la présence possible d'ions baryum dans l'effluent. On peut alors éviter l'entartrage en se contentant d'une vidange périodique de l'appareil avant qu'il ne se forme un dépôt de chlorures.

Il nous a paru bon d'abord, étant donné les difficultés que présentent aussi bien la redissolution du sulfate de chaux que le démontage des appareils, d'étudier la possibilité d'un traitement préalable des eaux en tenant compte de la nécessité d'éviter la présence de sels de baryum solubles dans l'eau, ce métal étant très toxique pour l'organisme humain. Ensuite, il nous a semblé intéressant d'étudier la décomposition des solutions de bicarbonate de soude exposées à l'atmosphère pour mettre en évidence le processus le plus lent qui régit cette décomposition. Les solutions de bicarbonate présentant une tension de dissociation proportionnelle à la concentration; il était intéressant de mettre en évidence l'influence des sels étrangers sur cet équilibre.

### L'entartrage par les eaux saumâtres du Sud-Algérien

Ces eaux chlorurées calciques et magnésiennes sont pratiquement saturées en sulfate de chaux; leur teneur est voisine de 2 g par litre. Or, il est bien connu que si les inhibiteurs d'entartrage ralentissent la décomposition des bicarbonates et évitent le grossissement des cristaux fixés sur les parois, ils n'ont pratiquement aucune action sur les dépôts de sulfates peu solubles. Les appareils de distillation solaire du type serre, lorsqu'ils sont alimentés avec les eaux du Sud, se remplissent rapidement de dépôts de gypse très difficiles à éliminer sans démonter l'appareil pour effectuer le nettoyage, ce qui pose le problème des joints de verrières. Le mastic souple utilisé devient en effet très dur au bout de quelques mois, et le démontage est alors aléatoire et ne se fait pas facilement sans casse.

Nous pensons que l'on pourrait pallier ce défaut en effectuant une épuration préalable, éliminant les

\* Professeur à la Faculté des Sciences d'Alger, Chef d'unité de recherches, Institut de l'énergie solaire de l'Université d'Alger, Algérie.



sulfates. Cette opération ne peut se faire qu'en utilisant l'insolubilité du sulfate de baryte. On a utilisé autrefois l'épuration par un mélange de carbonate de baryum et de chaux, méthode abandonnée comme trop coûteuse.

Utilisée avec les eaux du Sud, cette méthode, nous avons pu le constater, donne des résultats intéressants, mais elle présente le défaut de demander une installation d'agitation, le mélange solide devant rester en suspension pendant deux heures pour que les réactions chimiques puissent s'effectuer. Il ne reste plus qu'à faire une décantation, et le liquide surnageant ne contient pas de sels de baryum solubles toxiques pour l'organisme humain.

Nous avons donc étudié un procédé plus simple : l'addition de chlorure de baryum en quantité suffisante pour précipiter les carbonates et les sulfates. Il suffit de mélanger en quantité convenable l'eau à traiter et la quantité équivalente de solution de chlorure de baryum, puis de laisser déposer pendant la nuit le sulfate de baryte produit; il ne reste alors qu'à décanter l'eau traitée.

Le sulfate de baryte peut d'ailleurs être utilisé par les pétroliers pour les boues de forage, si la quantité obtenue présente une certaine importance. La méthode est très simple, mais elle risque de laisser des sels solubles de baryum dans l'eau en cas de surdosage.

On peut effectuer facilement le contrôle de l'absence de baryum au moyen d'une réaction à la touche sur papier très sensible (la coloration rose du rhodizonate de baryum, qui peut se faire sans avoir à sa disposition un laboratoire complet). Une correction éventuelle peut être faite par une addition convenable d'eau brute.

Un essai pratique a été effectué au laboratoire avec une eau de provenance d'El-Oued, titrant 186° hydrotimétriques et contenant environ 2 g de sulfate de calcium par litre. Évaporée directement, cette eau commence à déposer lorsque son volume est réduit à 80 p. 100 seulement et donne déjà environ 1 g par litre de dépôt lorsque son volume est réduit à moitié. Traitée au chlorure de baryum et réduite au 1/20, le dépôt qui se forme est seulement de l'ordre de 0,05 g, ce qui permettrait d'utiliser les appareils

serre sans risquer d'entartrage notable, même en ne faisant que des purges espacées tous les deux ou trois jours.

### La décomposition des solutions de bicarbonate de soude

Le bicarbonate de soude en solution subit une réaction de dismutation; il se forme du carbonate neutre et de l'acide carbonique instable qui se décompose en gaz carbonique et eau. Si la surface de la solution est en contact avec l'atmosphère, on peut considérer que la teneur en acide carbonique y est nulle. Comme, d'après la loi de Henry, il y a équilibre entre la tension du gaz carbonique dans la solution et celle qui existe dans l'atmosphère, le gaz tend à s'échapper de la solution et cette dernière voit sa composition varier. Il était intéressant de mettre en évidence les facteurs qui influent sur cette décomposition.

Dans une première série d'expériences, des solutions à différentes concentrations ont été placées soit dans des béchers à 25° et 60°, soit dans des tubes à essais à 60°. La teneur en bicarbonate restant est dosée en fonction du temps. Le tableau 1 résume les résultats obtenus.

Ces expériences conduisent à faire les remarques suivantes :

a) Le taux de bicarbonate restant est indépendant de la concentration initiale de la solution. Le processus qui détermine la vitesse est donc un processus du premier ordre;

b) Le coefficient de température entre 25° et 60° est voisin de 8, et on sait qu'en moyenne la vitesse d'une réaction double quand la température augmente de 10°, alors que le taux d'augmentation d'une vitesse de diffusion est de 1,25 seulement pour 10° ce qui correspondrait à une augmentation voisine de 2 pour passer de 25° à 60°;

c) Le rapport des vitesses entre béchers et tubes à essais est de 12, alors que le rapport des surfaces est de 16 et celui des hauteurs des solutions est de 10.

Cette première série d'essais ne permettant pas de mettre nettement en évidence le rôle des diffé-

Tableau 1

	Durée de l'expérience (en heures)	Béchers		Tubes à essais			
		25°	60°	60°	60°		
Température . . . . .							
Concentration initiale . . . . .		saturée au 1/10	saturée au 1/10	saturée au 1/10	saturée au 1/10		
Teneur en bicarbonate restant . . . . .	1	89,7 %	89,5 %	64,3 %	64,3 %	93,7 %	94,2 %
	2	84,8 %	84,8 %	53,1 %	53,1 %	91,1 %	90,7 %
	3	79,3 %	76,9 %	41,4 %	41,4 %	88,2 %	88,2 %
	4	74,5 %	74,2 %	34,8 %	34,2 %	84,7 %	84,7 %
	5	70,7 %	69,5 %	28,1 %	28,0 %	81,2 %	81,2 %
	17,5	50,9 %	48,9 %	9,8 %	9,1 %	57,9 %	57,9 %
	24	45,7 %	46,1 %	4,5 %	4,0 %	53,1 %	53,2 %

rents facteurs, trois nouvelles séries ont alors été effectuées en ne changeant que l'un des facteurs à la fois.

1) Une série est effectuée dans des béchers identiques, avec une hauteur de liquide constante et une surface identique; les essais sont effectués à la même température. On constate alors que pour un même laps de temps, le taux de décomposition est indépendant de la concentration, comme l'indique le tableau 2.

Tableau 2

Concentration de la solution . .	saturée	au 1/2	au 1/4	au 1/10
Taux de bicarbonate restant.	69 %	69 %	67 %	69 %

2) Une série est effectuée à température constante et hauteur de liquide constante. La même quantité de bicarbonate est placée dans des récipients de diamètre variable, et la hauteur de liquide est ajustée pour être la même par addition d'eau distillée. Cette fois, le rapport des surfaces varie en sens inverse du rapport des concentrations. On établit le tableau 3.

Tableau 3

Rapport des surfaces . . . .	1	1,4	2,2	4,7
Taux de bicarbonate restant.	54 %	58 %	56 %	60 %

Ce tableau indique qu'au bout d'un laps de temps donné on a des variations de 2 p. 100 seulement, alors que le rapport des surfaces varie de 1 à 4,7. La vitesse de décomposition est donc indépendante de la concentration et de la surface.

3) Une dernière série est alors effectuée en mettant dans des béchers identiques des quantités variables de solution, de manière à avoir une surface constante mais des hauteurs de liquide différentes. On établit le tableau 4.

Tableau 4

Hauteur du liquide . . . .	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	10 cm
Taux de bicarbonate restant.	64,5 %	73 %	81,5 %	86 %	94,5 %

Ce tableau montre donc nettement que la vitesse varie en sens inverse de la hauteur, ce qui nous amène à conclure que le phénomène le plus lent est la diffusion du gaz carbonique dans la phase liquide.

Ce résultat semble en opposition avec le coefficient de température, et doit être dû au fait qu'à 60°

il y a évaporation importante de l'eau. Le facteur observé correspond sensiblement au rapport des tensions de vapeur de l'eau à 25° et 60°.

### La mesure de la tension d'équilibre du gaz carbonique

Lorsque la solution n'est plus en contact avec l'atmosphère mais se trouve en présence d'un volume d'air limité, la tension partielle du gaz carbonique va augmenter jusqu'à une certaine valeur. Elle se stabilise quand la loi de Henry est satisfaite.

Cet équilibre est très lent à s'établir; ce qui est normal, puisque déjà en présence d'une concentration pratiquement nulle en gaz carbonique dans l'atmosphère, nous avons pu constater que la décomposition demandait plusieurs jours.

Par contre si, au lieu de laisser évoluer le système de lui-même, on le soumet à une agitation énergique, on constate que la pression partielle monte assez rapidement, et on obtient la pression d'équilibre au bout de quelques heures seulement. Il nous semble que l'on peut comparer ce résultat au fait qu'il est possible de chauffer de l'eau convenablement dégazée nettement au-dessus de 100° sans provoquer l'ébullition, s'il n'y a pas de centres favorisant la formation des bulles de vapeur. Cela expliquerait d'ailleurs le fonctionnement des inhibiteurs d'entartrage qui évitent le dégagement brutal de gaz carbonique par formation de bulles; le départ de gaz carbonique ne se fait plus que très lentement par diffusion.

Nous avons donc cherché à mesurer la tension de gaz carbonique d'équilibre en fonction de la concentration en bicarbonate de soude, d'abord seul, puis en présence de différents sels. Des résultats intéressants ont alors pu être mis en évidence :

a) Si, pour le bicarbonate de soude seul, la tension d'équilibre croît proportionnellement à la concentration en bicarbonate, allant de 38 mm de mercure pour 2 p. 100 à 102 mm pour 6 p. 100, ce qui correspond à une concentration en gaz carbonique libre de l'ordre de 1/100 de la concentration en ion bicarbonate, des résultats très différents peuvent être obtenus en présence de sels neutres.

b) En présence de concentrations croissantes de chlorure de sodium, la tension d'équilibre de gaz carbonique croît légèrement, ce qui correspond à la diminution de solubilité du gaz carbonique dans les solutions de sels.

c) En présence de chlorure de magnésium, l'augmentation de pression est nettement plus importante, mais ce qui nous a semblé intéressant à signaler, c'est que si l'on fait la mesure en présence de chlorure de calcium ou de chlorure de baryum, la pression devient près de 50 fois plus forte, comme si tout l'ion bicarbonate présent était décomposé en donnant du carbonate insoluble et du gaz carbonique libre.

Nous avons donc l'intention de continuer cette étude pour déterminer les conditions les plus favorables pour cette mise en liberté d'acide carbonique.

Nous pensons appliquer ensuite ces observations à l'étude des eaux naturelles. Il semble qu'il serait intéressant, en effet, de comparer cette mesure directe du gaz carbonique libre et de l'ion bicarbonate présent ainsi que les résultats obtenus avec les formules théoriques utilisées actuellement.

### Conclusion

En résumé, nous avons donc cherché à élucider deux points importants pour l'utilisation des distillateurs solaires :

1) Nous avons cherché à préciser les corrections sommaires à faire subir aux eaux saumâtres pour éviter l'entartrage, et nous étudions actuellement un procédé de dissolution des croûtes de sulfate de

chaux qui se forment avec les eaux sulfatées calcaïques du Sud.

2) L'étude de la dissociation des bicarbonates permet de mettre en évidence les processus de formation des dépôts par départ du gaz carbonique pour les incrustations de carbonate. Il nous semble que les résultats obtenus par mesure de la tension d'équilibre du gaz carbonique permettront aussi de préciser directement les notions de gaz carbonique équilibrant et d'ions bicarbonates présents dans les eaux naturelles.

Il semble, d'après les premiers résultats obtenus, que l'on puisse envisager une étude de la stabilité des eaux naturelles qui pourrait compléter les résultats obtenus actuellement par les seules mesures de pH; cette étude est actuellement en cours.

## APPLICATION OF THEORETICAL PRINCIPLES IN IMPROVING THE PERFORMANCE OF BASIN-TYPE SOLAR DISTILLERS

George O. G. Löf\*

The production of pure water from the sea is one of numerous applications of solar energy readily workable from the technical standpoint, but difficult from the economic point of view. The processing of raw material by use of energy and equipment, at a total cost of less than 20 cents per ton is an exceptionally difficult task.

As a consequence, most of the recent development work has been directed toward reducing the cost of solar distiller construction through use of cheaper materials, simpler designs and other measures. Less effort has been devoted to *technical* improvements which might increase distiller efficiency and reduce the necessary size of a unit for a certain water production capacity. There has been even less work in the study of the basic principles in the solar distillation process. It is with these two technical areas that this paper is concerned. A recent study of fundamental principles in the solar distillation process is summarized and some new work on the effects of thermal storage in the distillation basin and its contents is reported. The manner in which these technical developments may influence the practical design of solar stills and the *economics* of the solar distillation of sea water is indicated.

### Solar distillation methods and equipment

Before the significance of the new solar distillation research work is explained, the general characteristics of the process and its equipment should be briefly examined. A paper by Strobel (6) contains detailed information on this subject, so only the essential features are mentioned here. The basin-type solar still, shown diagrammatically in figure 1, consists principally of a shallow black basin or pond covered by sloping transparent surfaces of glass or plastic film. If sea water is placed in the pond, slow evaporation takes place from the water surface due to the heating by solar radiation absorbed on the basin bottom. The cover is cooled by the atmosphere, so condensation of pure water occurs on the inside of that surface, the distillate being collected in small gutters or troughs at the low edges of the transparent cover. Discard of a portion of the unevaporated brine prevents accumulation of salts in the basin.

\* Consulting Chemical Engineer, Denver, Colorado; also, Research Associate, University of Wisconsin, and Resources for the Future, Inc.

The figure shows the design of an experimental, glass-covered solar distillation pilot plant constructed in Florida about two years ago (2). Factors distinguishing it from earlier designs are a deeper water layer, no bottom insulation, and construction directly on the ground rather than on an elevated platform. Conservation of heat from the distiller bottom is made possible by the large ground area covered and the negligible downward conduction loss. The advantage of this design is its simple and cheap construction. The distiller will produce about 0.1 gallon per sq ft on a sunny day, at a fairly uniform rate through the 24-hour period.

Figure 2 is a sketch of a basin-type still provided with a plastic film cover supported by slight internal air pressure from a small blower (2). Operation of the still is similar to that previously described, with the exception that this design responds much more rapidly to changes in solar radiation and atmospheric temperature. The shallow layer of water achieves a higher temperature during mid-day hours than the deep-basin still, and the unit operates at a high rate during this part of the day. Total production appears slightly higher than the deep basin output, under comparable conditions.

Numerous experimental modifications of this basic type solar distiller have been made (3). In most cases, such as the tilted-wick type still and each section of a multiple-effect solar still, the operating principle and the energy balance relationships are the same as those applicable to the basin-type still. When judiciously applied, therefore, the quantitative treatment outlined in this paper may be used in evaluating and designing these modifications.

### Quantitative aspects of the solar distillation process

Several recent studies have contributed materially toward a full understanding of the complex processes taking place in a basin-type solar still. Löf, Eibling, and Bloemer (4) have made an analytical study of most of the variables affecting solar distiller operation. A review of the more significant results of this analysis is presented here, and an extension of the study into the quantitative effects of water depth and thermal storage is discussed. Baum (1) has also reported a study along similar lines.

Figure 3 shows diagrammatically the principal energy exchange mechanisms in a basin-type solar

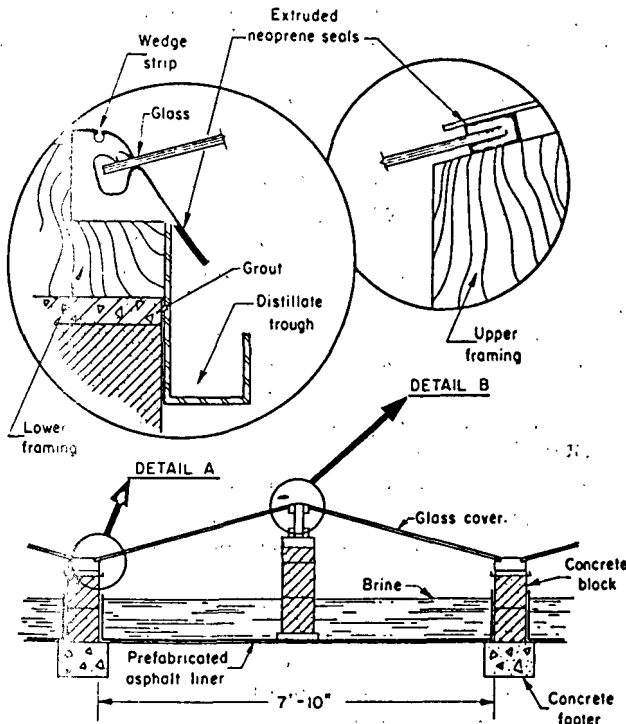


Figure 1. Cross section of glass-covered deep-basin solar still

distiller. Solar radiation, direct and diffuse, is absorbed on the black bottom of the basin. The quantity of radiant energy absorbed is decreased by reflection losses from the cover surfaces, the water surface, and the bottom itself. There may also be some absorption of solar energy in the distiller cover. Energy absorbed on the basin bottom is then largely transferred to the salt water by conduction and convection. A small fraction of the absorbed heat may be lost by conduction into the ground.

At the water surface, energy is transferred to the cover by three mechanisms. The principal means is by vaporization of water from the liquid surface;

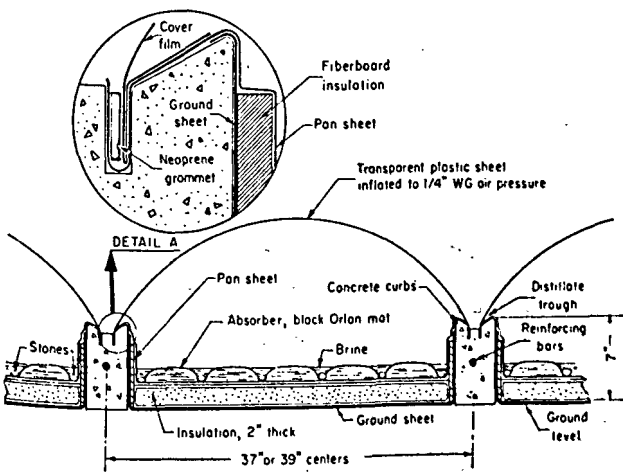


Figure 2. Cross section of air-supported plastic solar still

the vapor moves to the cover by diffusion and convection where its latent heat is liberated by condensation. Some heat is also transferred to the cover by the air circulating in the distiller. Thirdly, heat is radiated from the water surface to the cover where it is largely absorbed. The cover may, however, be partially transparent to thermal radiation, and some may pass directly through into the surroundings.

Heat conducted through the cover is transferred to the atmosphere by radiation and convection. Additional thermal flows may be as sensible heat in the entering sea water and sensible heat in the brine and distillate leaving the distiller. Leakage of vapors and liquids may also involve thermal losses. A final energy term is the change in enthalpy of the basin contents during a particular time interval. This is an important item because of unsteady state operation due primarily to highly variable solar radiation rate and considerable thermal capacity even in shallow-basin stills.

The energy transfer relationships outlined above show that the direct, solar-heated solar still is not a simple device from the point of view of the processes taking place within it. The mechanism of transfer of water from salt water surface to condensing surface is particularly complicated. In addition to questions of conduction and diffusion resistances, there are problems concerning eddy diffusion, degree of approach to saturation at the two surfaces, buoyancy effects due to density differences, and others.

In an evaluation of the effects of certain design and operating variables in a solar distiller of the basin type, various energy transfer and mass flow relationships were formulated as completely as possible, and the specific effects of changing certain variables were determined by means of computer analysis. The procedure involved setting up a complete, overall energy balance on the entire distiller, a second energy balance around the condensing surface, and a mass flow balance equating water

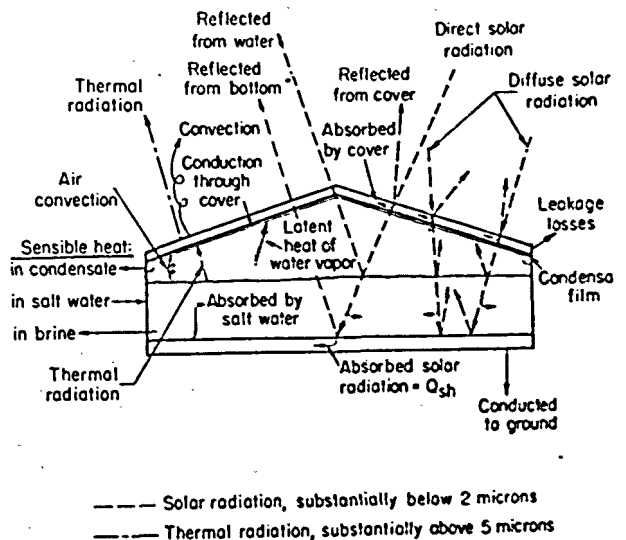


Figure 3. Energy-flow diagram of a basin-type solar still

production rate to its equivalent in terms of a convection coefficient.

The three complete equations representing energy and material balances in the basin-type distiller depend on only the two assumptions that there are no temperature gradients in the cover surface or in the salt-water pool. Without materially impairing their general applicability, the complexity of these equations can be reduced. For their simplification and solution, the following additional assumptions and approximations were therefore made:

(a) The cover cannot "see" itself, i.e., negligible interception of radiation from the cover by other parts of the cover.

(b) Glass cover, assumed, with 0.94 emissivity and zero transmissivity for thermal radiation.

(c) External, non-glazed areas of still have average effective absorptivity of 0.55, and of this absorbed radiation, 10 per cent is usefully conducted to the still.

(d) Distilled water leaves still at temperature of cover.

(e) Two-thirds of feed is distilled; one-third is discarded as approximately 10 per cent salt solution of 0.9 specific heat.

(f) Negligible leakage of brine, distillate, and vapor.

(g) Conduction loss to ground based on assumed soil conductivity of 0.5 btu/hr sq ft °F/ft.

(h) Thermal capacity of basin structures and of the ground layers under the still which undergo significant temperature change can be represented by an equivalent additional depth of water. (In most

computations, thermal storage was neglected, i.e., the results are applicable to a hypothetical still of zero heat capacity.)

(i) Internal convection coefficient in the distiller can be represented by a relationship for free convection heat transfer between parallel plates, modified empirically by multiplying it by a function of water temperature to make it applicable to wetted surfaces.

(j) Factor for radiation transfer from water to cover, based mainly on shape factor for parallel plates, is 0.85.

(k) Re-evaporation of condensate from collection troughs is proportional to their fraction of the total solar intercepting area. Zero reflux assumed.

(l) Heat of condensation of water vapor assumed constant at 1 040 btu/lb.

(m) Negligible heat transfer from structures to cover.

(n) For heat transfer from internal structures to cover, assume the coefficients for water to cover are applicable.

(o) Moisture carried from basin to cover can be represented by the absolute humidity difference of saturated air at water and cover temperatures, multiplied by an experimentally determined correction factor less than unity.

(p) Sensible heat in distillate and brine plus heat loss to ground minus sensible heat in sea-water supply were found experimentally to be less than 4 per cent of solar input and were considered negligible in the calculations.

By use of the above assumptions and conditions, the complete equations were simplified to the following:

Over-all energy balance:

$$I_o (1 - \Sigma r - 0.5 A'_{st}/A_p) = \frac{A_c}{A_p} [h_o (t_c - t_a) + 0.173 \times 10^{-8} (T_c^4 - (fT_a)^4) \times 0.94] + Lx (A_w/A_p) \times 62.4 \times (t_{w2} - t_{w1}) \quad (1)$$

Energy balance around cover:

$$(A_c/A_p) [h_o (t_c - t_a) + 0.173 \times 10^{-8} (T_c^4 - (fT_a)^4) 0.94] = \frac{(A_w + A_{ist})}{A_p} \times C (t_{w_{av}} - t_c)^{4/3} + \frac{A_w + A_{ist}}{A_p} [0.173 \times 10^{-8} (T_{w_{av}}^4 - T_c^4) 0.85] + \frac{A_p - A'_{st}}{A_p} I_o \bar{\alpha}_{cs} + D (1 + K) 1040 \quad (2)$$

Evaporation rate:

$$(A_p/A_w) (1 + K) D = (C/0.24) (t_{w_{av}} - t_c)^{1/3} F (W_{s_{w_{av}}} - W_{s_c}) \quad (3)$$

The above equations contain three unknowns ( $t_w$ ,  $t_c$ , and  $D$ ), and 17 constants or parameters. The equations were first put into more convenient form for solution by substituting equation (3) for  $D$  into equation (2) and combining the resulting relationship with equation (1). In most of the computations, thermal storage in the distiller was taken as zero, so the last term in equation (1) was omitted. It was included in the determination of storage effects, as explained below.

The parameters  $C$  and  $F$  were not directly measurable, and in order that computed results could be based on realistic figures, their "standard" or actual values in the 2 500-square-foot experimental unit in Florida (4) were determined by substitution of operating data in the equations and solving them simultaneously for these two factors.  $F$  was found to have a nearly constant value of 0.255, whereas  $C$  was found to vary with water temperature as  $C = 0.0372 t_w - 3.273$ . For the computation,  $W$  was

also related to the temperature by an empirical equation of best fit to the humidity curve.

After substitution of the above values in the three final equations, "standard" or typical values of all variables except  $t_w$ ,  $t_c$ , and  $D$  were chosen. Choice was based on experience with solar distillers, properties of materials, and the characteristics of the experimental unit in Florida. (Physical dimensions of the Florida unit were chosen as "standard" for the computations.)

By holding all variables at their standard values, except one, and varying that one factor over a practical range, its particular effect on water temperature, cover temperature, and hourly distillate yield was determined by automatic computer analysis. These determinations were all made at the chosen "standard" thermal storage capacity of zero. This is not really a typical situation, inasmuch as all basin stills have at least moderate thermal capacity, but the computations are greatly simplified if this factor is neglected when determining the influences of the other variables.

In the analysis of thermal storage effects, the last term in equation (1) was retained, and all variables were held at their "standard" values except effective water depth, atmospheric temperature, solar radiation, and effective reflectivity of the still for solar radiation. The energy balance equations were then employed in determinations of the 24-hour temperature and productivity histories of solar distillers having effective water depths of  $\frac{1}{2}$  foot and 1 foot. For these analyses, hourly solar radiation and temperature records for a clear day (May 5, 1959) were employed, and solar reflectivities were determined by use of actual angles of incidence on horizontal glass surfaces, assuming 100 per cent direct radiation. The day was then divided into bi-hourly periods

for calculation, and the salt water temperature in the basin at 6 a.m. was estimated. Use of the energy balances, by trial and error, permitted determination of cover temperature, productivity, and 8 a.m. water temperature. This procedure was repeated 12 times through the 24-hour period, and the final 6 a.m. salt water temperature was then compared with the initial assumption. Unless they agreed within one degree F, the entire calculation was repeated, with the new initial temperature. When agreement was obtained, the bi-hourly yields were totalled for the full day.

**Results**

The principal results of the computer analysis of a zero thermal capacity distiller are shown in figures 4 to 11, wherein basin water temperature, cover temperature, and hourly productivity are correlated with solar radiation, wind velocity, atmospheric temperature, reflectivity of the still, cover area, cover absorptivity, degree of approach to equilibrium in the vapor space, and re-evaporation of distillate. Figure 12 shows the results of the bi-hourly calculation of performance of three distillers having zero,  $\frac{1}{2}$ -foot, and 1-foot equivalent salt water depths, and figure 13 is a correlation of productivity with water depth.

It is seen from the zero-storage results that in all but two cases, a change in a variable which caused an increase in productivity also caused an increase in water temperature and cover temperature. Productivity is improved by increases in solar radiation, atmospheric temperature, and approach to vapor-liquid equilibrium at water and cover surfaces. Productivity is reduced by increases in wind velocity (external heat transfer coefficient), solar reflectivity

Table 1. Values of parameters used in analysis

VARIABLES			
Variable	Range	"Standard value"	
$I_o$ , solar radiation, btu/(hr)(ft <sup>2</sup> ) . . . . .	10-350	200	
$\epsilon_r$ , reflectivity . . . . .	.05-.30	0.10	
$A_c/A_p$ , cover area/plant area . . . . .	0.8-3.0	1.0	
$h_o$ , external coefficient, btu/(hr)(ft <sup>2</sup> )(F) . . . . .	1.0-10.0	2.0	
$t_a$ , atmospheric temperature, F. . . . .	50-110	80	
$F$ , absolute humidity ratio. . . . .	0.1-0.7	0.225 (pilot plant)	
$K$ , reflux and re-evaporation ratio. . . . .	0-0.50	0.02 (pilot plant)	
$f$ , ratio $T_s/T_a$ . . . . .	0.86-1.0	0.95	
$\alpha_{cs}$ , absorptivity of cover . . . . .	0.01-0.6	0.04	
$A'_{si}/A_p$ , $\frac{\text{projected structure}}{\text{plant area}}$ . . . . .	0-0.15	0.10	
$(A_w + A_{i,si})/A_p$ , $\frac{\text{water + interior structure}}{\text{plant area}}$ . . . . .	0.9-1.1	1.0	
$L$ , equivalent water depth, ft. . . . .	0-1.0	0	
CONSTANTS			
$\epsilon_c$ (emissivity of cover). . . . .	0.94 (glass)		
$\epsilon_w$ (emissivity of water). . . . .	0.96		
$\epsilon_{woc}$ (internal radiation exchange factor) . . . . .	0.85		
$A_p/A_w$ . . . . .	1.205 (pilot plant)		

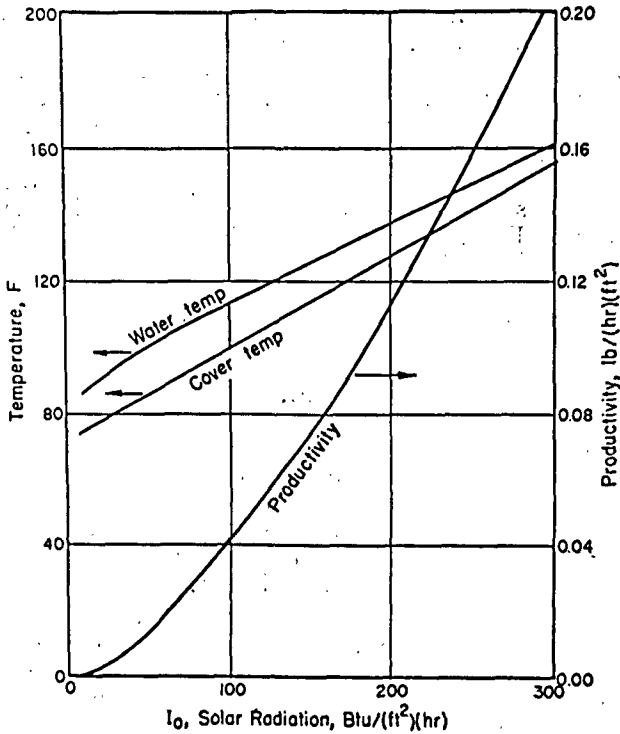


Figure 4. Effect of solar intensity on distiller performance

of distiller, cover area, cover absorptivity for solar radiation, and re-evaporation of distillate. Three other independent variables (shown in table 1) were also varied, but their effects on productivity were small, and the results are omitted here. Particularly interesting because of their trend or magnitude are : (figure 4) — the large influence of radiation on yield (a radiation increase from 100 to 250 btu/ft<sup>2</sup> hr causes a 4-fold increase in productivity); (figure 5) — the serious decrease in yield under windy conditions; (figure 6) — substantial yield increase with atmospheric temperature; (figure 8) — the sharp decrease in yield as cover area is enlarged

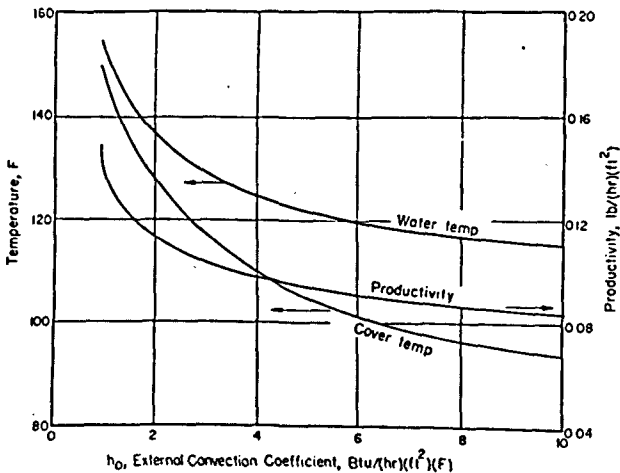


Figure 5. Effect of wind velocity (external heat transfer coefficient) on solar distiller performance

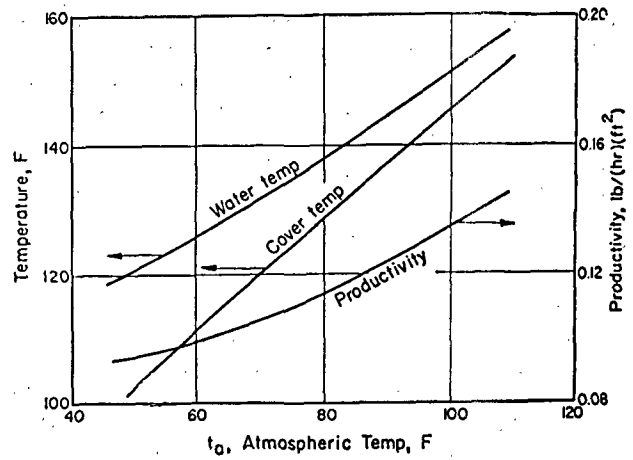


Figure 6. Effect of atmospheric temperature on solar distiller performance

(clearly pointing out the fallacy in a steeply pitched cover); (figure 9) — the rather small effect of cover absorptivity in the practical range encountered with window glass of reasonable quality; and (figure 10) — the major importance of a close approach to saturation and temperature equilibrium at the two surfaces in the distiller enclosure.

In general, these results are self-evident in showing the design and operating objectives which should be sought. Distiller location in hot, sunny, calm regions is desirable. Covers of high transmissivity at the lowest practical angle with the basin should be used. Enclosure designs, yet to be determined, which facilitate the best possible vapor transfer rate to and from the air circulating in the enclosure are advantageous. The apparent beneficial effects of increased operating temperatures suggest the possible advantage of a system of double transparent covers. This additional heat transfer resistance would produce a temperature rise, and possibly a higher yield. The added reflection loss might be great

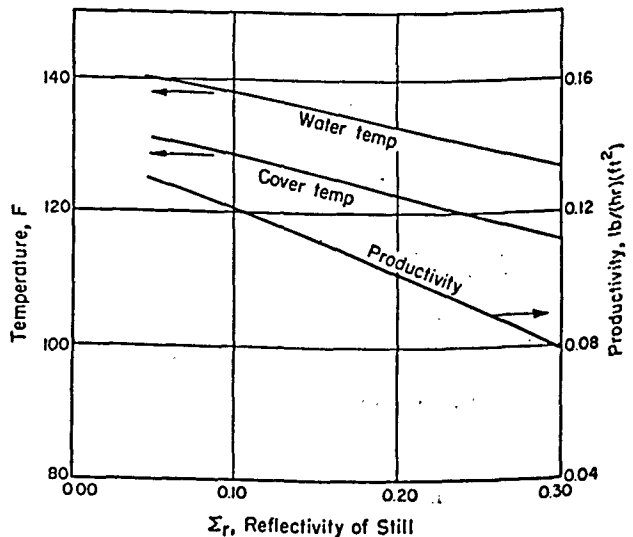


Figure 7. Effect of solar reflectivity on distiller performance



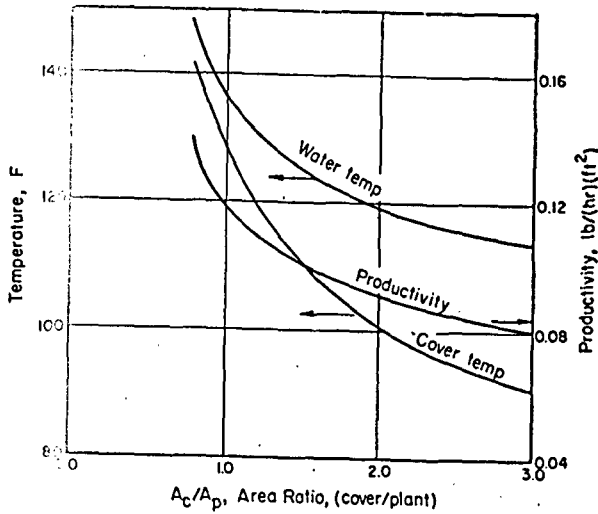


Figure 8. Effect of cover area on solar distiller performance

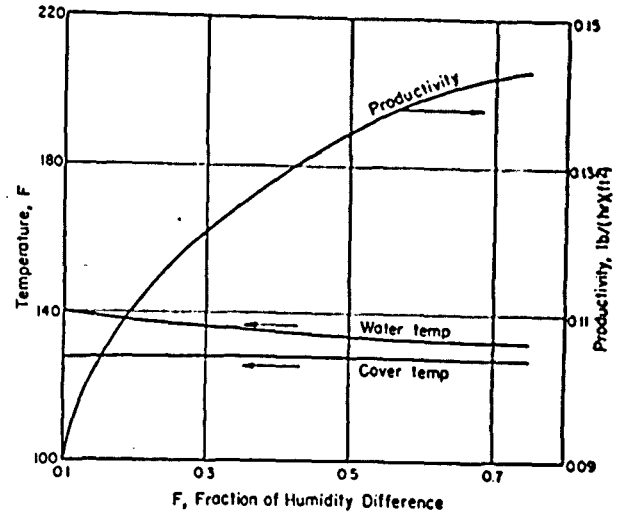


Figure 10. Effect of approach to vapor-liquid equilibrium in solar distiller

enough to offset the potential temperature rise, so the actual effect of a second cover needs further appraisal.

The results of the study of thermal storage effects show (figure 12) that the deeper the water, the smaller is the fluctuation in temperature and productivity through the 24-hour period. Maximum distillation rate occurs near noon in the zero storage still, and shortly after sunset in the still having thermal storage equivalent to one foot of water. Figure 13 shows that the 24-hour water production decreases sharply from a maximum in the hypothetical still (zero thermal capacity) to a little over half that output in a still having 1 foot of water storage. A "shallow-basin" still of two-inches equivalent water depth should have a productivity about 80 per cent of the hypothetical still operating under these specified conditions.

A certain amount of caution should be exercised in generalizing from these results. All of the design and operating parameters in the equations can be chosen to apply to a particular design and situation,

and the numerical values reported herein are based on such choices as they apply to the Florida test installation. It should be noted that each of the graphical correlations is applicable, in so far as absolute values are concerned, only when a full set of specific "standard" conditions prevail. These conditions involve two experimentally determined factors, *F* and *C*. In addition to the possibility of reasonable experimental error in these two terms, their values might show variability with design changes and radiation and temperature levels beyond those experienced in the experiments in which these factors were evaluated. It is probable, for example, that the zero thermal capacity still, operating at its high noon-time temperature, would have lower or higher values of *F* and *C* than those determined at fairly low temperature in a still having a water depth of  $\frac{1}{4}$ -foot. Another factor in performance differences is the cloudiness of the day. At low radiation levels the difference in productivity of deep and shallow basins would be smaller than in sunny weather, possibly reversing in very cloudy periods.

It is believed, however, that the trends indicated by these results are universally valid for distillers

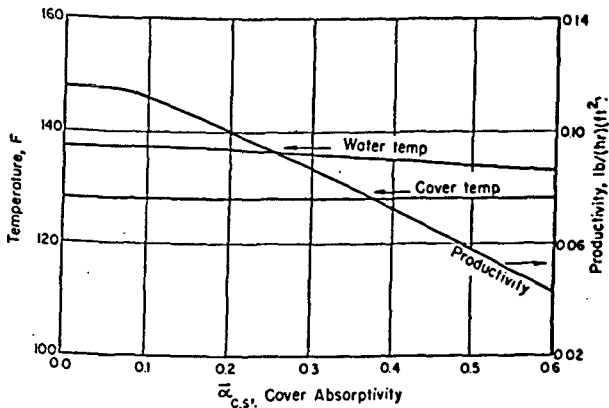


Figure 9. Effect of cover absorptivity on solar distiller performance

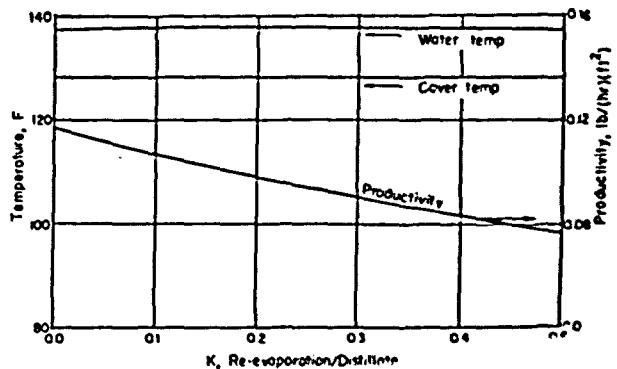


Figure 11. Effect of re-evaporation of distillate on performance

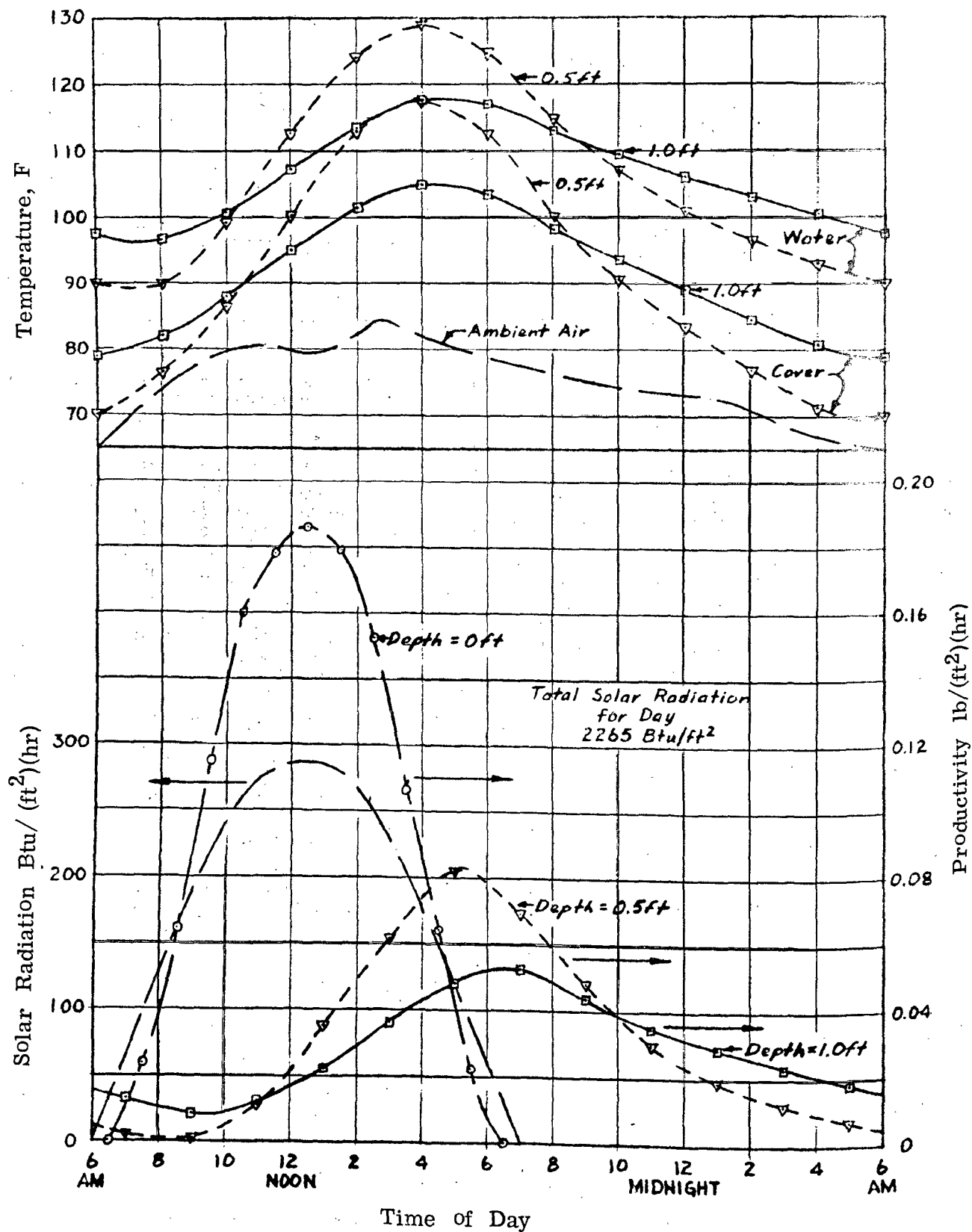


Figure 12. Hourly performance of solar stills of various depths

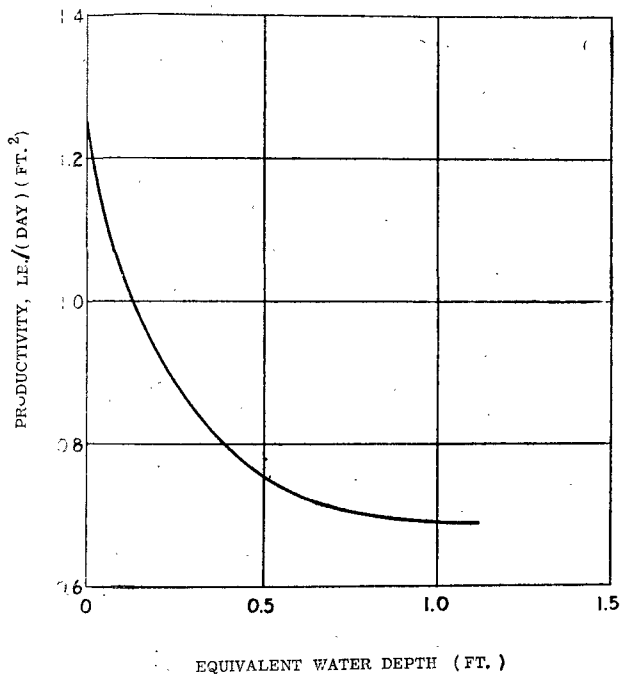


Figure 13. Effect of water depth on distiller performance

of the basin-type, and that the numerical values are closely applicable to a still of the same general design features and in conditions roughly comparable to the Florida test installation. The average experimental productivity of the Florida unit, at a  $\frac{1}{2}$ -foot water depth and a radiation level of 2 300 btu/sq ft, day, compares closely with the theoretical value determined by totalling the bi-hourly yields found in the thermal storage analysis.

In light of the results of the thermal storage study, the value of the deep-basin design concept may be examined. Unless some unforeseen factor should have a very large influence in reducing the computed yield in the zero storage still, there can be no question that its clear-day performance is substantially better than the deep basin design. The comparison is closer, however, when a "shallow-basin" still, of small but finite storage, is evaluated. And unless such a still is bottom-insulated, its salt water content, coupled with a delay factor for conduction resistance into and out of the ground, gives it considerable thermal capacity. It appears that the design having the smallest practical thermal capacity is the wick-type, but heat loss through insulation and edges needs to be weighed against the benefits of smaller storage capacity.

Thus, the practical comparison of deep and shallow distiller designs resolves itself into a weighing of construction and operating costs (which have reached the lowest values in the deep-basin experiments) against potential higher efficiencies in the low thermal capacity stills. To achieve notably higher productivity in the shallow basin designs, it is apparent that very thin water layers should be employed, thereby requiring high precision in levelling the distiller

bottom. In addition, for low thermal capacity, conduction to and from the soil would have to be minimized, and the cost of bottom insulation would have to be weighed against its benefits in minimizing thermal storage.

It appears that if the uninsulated shallow basin distiller can be built on the ground at costs per unit area not substantially in excess of the corresponding deep basin still, and if the operating costs are comparable, the higher efficiency of this unit should make it a preferred design. Unless these cost requirements can be met, efficiency differences may not be great enough to offset the construction and operating expense items. Further theoretical and experimental work is needed for a full evaluation of performance and cost factors.

### Definition of symbols

- $A_c$  = total surface area of transparent cover, sq ft.
- $A_{i\ st}$  = surface area of structures above water and below cover, ft<sup>2</sup>.
- $A'_{st}$  = horizontal projected area of exposed portions of plant other than glass surface, ft<sup>2</sup>.
- $A_p$  = total horizontal area of distiller plant, comprising area of water surface and ground area of structures, sq ft.
- $A_w$  = area of water surface, ft<sup>2</sup>.
- $C$  = parameter in equation,  $h_i = C(t_w - t_c)^{1/3}$ , btu/(hr) (ft<sup>2</sup>) (F<sup>4/3</sup>).
- $D$  = net distilled water production rate, lb/(hr) (ft<sup>2</sup> plant).
- $F$  = fraction of the limiting absolute humidity difference in the distiller enclosure which is actually achieved in operation, dimensionless.
- $f$  =  $T_s/T_a$ , dimensionless.
- $h_i$  = coefficient of heat transfer by convection from water surface to lower side of cover, btu/(hr) (ft<sup>2</sup> of water surface) (F temp. difference between water surface and cover surface).
- $h_o$  = coefficient of heat transfer by convection from transparent cover to atmosphere, btu/(hr) (ft<sup>2</sup> cover) (F temp. difference between cover and air).
- $I_o$  = solar radiation incident on horizontal surface, btu/(hr) (ft<sup>2</sup>) of gross distiller plant area.
- $K$  = ratio of re-evaporation plus reflux, to distillate yield, dimensionless.
- $L$  = equivalent depth of water in basin, ft.
- $\Sigma_r$  = total effective reflectivity of distiller plant for solar radiation, including reflection from cover surfaces, water surface, basin bottom, and supporting

structures above and below cover, dimension-less.

$t_a, T_a$  = temperature of atmosphere, F. R.

$t_c, T_c$  = temperature of transparent cover, F. R.

$T_e$  = effective temperature of the atmosphere for exchange of radiation, R.

$t_{w1}$  = temperature of water in basin at start of test period, F.

$t_{w2}$  = temperature of water in basin at end of test period, F.

$t_{w_{av}}, T_{w_{av}}$  = average temperature of water in basin during test period, F. R.

$W_{s_c}$  = absolute humidity of air saturated with water vapor at  $t_c$ , lb water/lb air.

$W_{s_w}$  = absolute humidity of air saturated with water vapor at  $t_w$ , lb water/lb air.

$\alpha_c$  = effective absorptivity of cover for solar radiation, averaged over appropriate angles of incidence, dimensionless.

### Acknowledgement

As co-authors of the paper cited in (4), J. A. Eibling and J. W. Bloemer of the Battelle Memorial Institute have contributed greatly to the research results reported herein. Their participation is gratefully acknowledged. Detailed analysis of thermal storage effects has been performed by D. A. Rester of this office, and his competent handling of a painstaking study is much appreciated. The substantial support of this work by the staff of the Office of Saline Water, U.S. Department of the Interior, is also given appreciative acknowledgement.

### References

1. Baum, V. A., The Technical Characteristics of Solar Water Fresheners of the Hothouse Type, in *Utilization of Solar Energy*, vol. II, p. 122, U.S.S.R., 1960.
2. Bloemer, J. W., Collins, R. A. and Eibling, J. A., Field Evaluation of Solar Sea-Water Stills, in *Saline Water Conversion*, A.C.S. Advances in Chemistry Series, p. 166, Dec. 1960.
3. Löf, G. O. G., Demineralization of Saline Water with Solar Energy, *Saline Water Research and Development Progress Report No. 4*, U.S. Dept. of the Interior, Aug. 1954.
4. Löf, G. O. G., Eibling, J. A. and Bloemer, J. W., Energy Balances in Solar Distillers, *A.I.Ch.E. Journal*, in press, 1961.
5. Mason, M. A. (editor), *Proceedings of the Symposium on Saline Water Conversion, 1957*, Publ. 568, National Academy of Sciences, 1958.
6. Stroebel, J. J., Developments in Solar Distillation, United States Department of the Interior, *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy, 1961*, included below, S/85.

### Summary

The practical application of solar energy to the demineralization of sea water in large quantity is contingent on the development of solar distillation equipment having low construction cost, long service life, and adequate productivity per unit of solar-receiving area. Recent experimental programs have been directed primarily toward cost reductions and improving durability. This paper deals with the fundamental principles and the energy transfer relationships in basin-type solar stills, with the object of improving their productivity and efficiency.

Complete energy balances and material balances were formulated for the processes occurring in a basin-type solar still. Three equations involving nineteen operating and design variables were developed.

The full equations were simplified by substituting constant values for a few of the parameters. The values of three factors were determined by use of operating data on an existing 2500 square-foot glass-covered, deep basin distiller, and solving the equations for these three unknowns after substitution of data in the equations.

The remaining variables were arranged in a form permitting solution of the equations for temperature

of the salt water in the basin, temperature of the cover, and distillation rate, as each of the eleven other factors was varied through a range of values. A still having zero water depth and an effective thermal storage capacity of zero was assumed. The numerical analysis was performed by machine computation.

The quantitative influence of salt-water depth (i.e., thermal storage) on distiller productivity was determined by making bi-hourly energy balances for distillers having effective water depths of  $\frac{1}{4}$ -foot and 1 foot throughout a particular 24-hour period, considering variation in atmospheric temperature and solar radiation on a clear day. These results were compared with the figures applicable to the hypothetical still of zero heat capacity.

Graphical relationships between the most significant of the variables are presented in the paper. They show in general that distiller productivity rises with increases in solar radiation, atmospheric temperature, and closeness of approach to vapor-liquid equilibrium at salt-water and cover surfaces. The yield is reduced by increases in solar reflectivity of the still, area of the cover, wind velocity, and by solar absorption in the cover. In most instances,

increased productivity is accompanied by increased temperature of water and cover surfaces. The study of thermal storage effects shows that the hypothetical still of zero heat capacity has the maximum 24-hour productivity, decreasing sharply to about half the output at an effective water depth of one foot. A distiller of nominal two-inch equivalent water

depth should yield about 80 per cent of the output of the zero storage still.

The results of the investigations are of major value in establishing desirable design and operating criteria in solar distillation systems and are being used in orienting current solar distillation development effort.

## APPLICATION DE PRINCIPES THÉORIQUES EN VUE D'AMÉLIORER LE RENDEMENT DE DISTILLATEURS SOLAIRES DU TYPE BASSIN

### Résumé

L'application pratique de l'énergie solaire à la déminéralisation d'eau de mer en grande quantité est fonction de la mise au point d'installations de distillation solaire d'un coût de construction peu élevé, d'un service durable et d'une productivité suffisante par unité de zone de réception solaire. Des projets expérimentaux récents avaient pour but principal de réduire le coût et d'augmenter la durabilité. Le présent mémoire traite des principes fondamentaux et des rapports de transfert d'énergie dans des distillateurs solaires du type bassin, en vue d'améliorer leur production et leur rendement.

On a formulé des bilans complets d'énergie et de matière pour les processus qui ont lieu dans un distillateur solaire du type bassin. On a établi trois équations portant sur 19 variables de fonctionnement et de conception.

On a simplifié les équations complètes en substituant des valeurs constantes à quelques uns des paramètres. On a déterminé les valeurs de trois facteurs en employant des données obtenues au cours de l'exploitation d'un distillateur existant à bassin profond de 2 500 pieds carrés recouvert de verre et en résolvant les équations pour ces trois inconnues après substitution de données dans les équations.

On a disposé les autres variables de façon à permettre de résoudre les équations pour la température

de l'eau salée dans le bassin, la température de la couverture, et le taux de distillation, en donnant à chacun des 11 autres facteurs une série de valeurs variées. On est parti de l'hypothèse d'un distillateur ayant une profondeur d'eau de zéro et une capacité effective de réserve thermique de zéro. L'analyse numérique a été effectuée par des machines à calculer.

On a déterminé l'influence quantitative de la profondeur d'eau saumâtre (réserve thermique) sur la productivité du distillateur, en établissant des bilans thermiques toutes les demi-heures pour des distillateurs ayant une profondeur d'eau effective de  $\frac{1}{2}$  pied et de 1 pied pendant toute une période particulière de 24 heures, compte tenu des variations de température atmosphérique et du rayonnement solaire pendant une journée ensoleillée. On a comparé ces résultats avec les chiffres applicables au distillateur hypothétique d'une capacité thermique égale à zéro.

L'auteur présente les rapports graphiques entre les variables les plus importantes. Ils démontrent, en général, que la productivité du distillateur est fonction de l'accroissement du rayonnement solaire, de la température atmosphérique et de l'équilibre vapeur-liquide le plus rapproché possible aux surfaces de l'eau saumâtre et du recouvrement.

## PRESENT STATUS AND FUTURE OF THE SOLAR STILLs

*Giorgio Nebbia* \*

### Present diffusion of the studies on solar stills

The solar stills, used for the first time in Chile at the end of the last century in the only large scale plant so far built (1), attracted renewed interest around 1930 (2, 3, 4) but became a subject of systematic studies only during the Second World War in the United States (5). Dr. Telkes studied the fundamental elements of the thermodynamics of the system and this gave a basis for her own and for the next developments.

After 1950, the studies on solar stills spread greatly in various countries, due to the publicity given by the Office of Saline Water of the U.S. Department of the Interior to the general problem of the demineralization of saline waters.

The results of many workers have been publicized through the Annual Reports and the Research and Development Progress Reports of the Office of Saline Water (6); this office also organized a Symposium in Washington, D.C., in November 1957 (7).

To the writer's knowledge, the following groups have recently been, or are at present, engaged in the development of solar stills. The name of the principal investigators is also indicated.

New York University, Solar Laboratory, New York, N.Y. (Maria Telkes) (5, 8, 9, 10, 11, 12, 13).

University of California, Richmond, Cal. (E. D. Howe) (14, 15, 16, 17).

Du Pont de Nemours and Co. Inc. at Daytona Beach, Florida.

University of Wisconsin, Solar Energy Laboratory, Madison, Wisconsin (J. A. Duffie).

Bjorksten Research Laboratories Inc., Madison, Wisconsin (Risto P. Lappala) (18, 19).

Denver, Colorado (George O. G. Löf) (20, 21, 22).

Centre Études Hydrogéologiques du Maroc, Rabat, Morocco (R. Ambroggi) (23).

Comision Nacional de Energias Especiales, Madrid (L. Fontan) (24).

SETUDE, Algiers, Algeria (Cyril Gomella) (25, 26, 27).

Università di Bari, Istituto di Merceologia, Bari, Italy (Giorgio Nebbia).

Kyrenia, Cyprus (R. Fitzmaurice) (28).

Israel Scientific Research Council.

Kenya Ministry of Works, Nairobi, Kenya (Gordon T. W. Blake).

Egypt, Cairo University and Alexandria University.

Teheran, Iran, Lichtfield, Whiting, Panero, Severud and Associates Cons. Engrs. (Tim de Jong) (29).

Soviet Union, Energetichskii Institut, Akademiya Nauk, Moscow, USSR (V. A. Baum and P. M. Brdlik) (30).

C.S.I.R.O., Division of Industrial Chemistry, Melbourne, Australia (B. W. Wilson) (31).

The main purpose of the above groups is (a) to develop new models of solar stills in order to increase the water production per surface unit, (b) to check the use of new construction materials in order to lower the cost of the stills and (c) to study the applicability of solar stills for the production of large amounts of fresh water.

Almost all the present models present a collecting surface of a fraction of one or of a few sq meters but their development and observation have given an enormous amount of information on the usefulness of further developments.

To the writer's knowledge, there are two thermodynamic treatments of the efficiency of the solar stills, one developed by Telkes (5, 11) and one outlined by Brdlik (30). These treatments are of great interest although perhaps the complete knowledge of the phenomena related to the working of a solar still requires further refinements on the basis of experimental data.

An excellent review of the various models of the solar stills is contained in a report by Löf (20).

In general the work of the above listed groups proceeds along a few common lines:

(a) The testing of solar stills of the roof-type model, varying details of design and the construction materials both for the water tray and the rigid roof; usually in these models the tray contains a thin layer of saline water and the bottom of the tray is insulated.

(b) The development and testing of plastic film stills, especially of inflatable type, using newly developed plastic materials (films of Mylar, Teflon and Teslar) which are rendered permeable with various processes (32).

(c) The development of tilted flat stills, both with rigid glass cover (11, 12, 13) and with plastic film cover (18, 19); in such stills the water is absorbed by a black porous evaporator which keeps the water layer perpendicular to the solar radiation; the amount of solar heat which reaches the water is maximum.

\* Istituto di Merceologia, Università di Bari, Bari, Italy.

(d) The development of deep basin solar stills proposed by Löf. In such stills a great amount of water (a layer of 30 cm and more) is heated by solar energy within a roof-type solar still placed in the ground; the water heats the surrounding ground until it reaches a rather constant temperature greater than the external one, and begins and continues the distillation, day and night (22).

### The work on the solar stills at the Università di Bari

In the present paper some emphasis will be given to the work of the writer who became interested in the field in 1953. The experimental work has been carried out in the Universities of Bologna and Bari, Italy, and was supported financially by various organizations (33).

During the spring and summer of 1953 three units were assembled; each was a roof-type model of solar still built using different construction materials.

The main characteristics of these stills and of those built in the following years are collected in table 1. Figure 1 shows photographs of the same stills.

The first model (figure 1, No. 1) was an all-plexiglas box, with a tray surface of 0.16 sq meters, uninsulated, and distilled some hundreds of ml of water per day. With this unit the first difficulties in assembling the plexiglas plates were encountered and also the drop condensation on the plastic surface of the condensing area was met.

The model No. 2 was glass-and-wood; it appeared heavy and of low efficiency; better results were obtained with the model No. 3 which combined the easy assembly of plexiglas with a glass-wettable condensing surface, mounted in a plexiglas frame (34, 35).

In the next months, between 1953 and 1954, an investigation was carried out on the fresh water

needs in many sites in southern Italy and in a few sites abroad (36, 37).

It is the opinion of the writer that a world-wide investigation of the market for solar stills—and, in general, for the equipment using the solar energy—is not yet available and should be very useful.

In 1954, a new series of solar stills was built according to a new model (No. 4) with iron tray and frame and glass roof. The three units so prepared were very simple to manufacture and assemble and rather efficient but very heavy (36, 37).

The No. 5 model was developed in 1955 (38) in order to study the possibility of adapting the solar stills on the roofs of houses. Such units, with 10 sq meter trays, gave a rather low yield of fresh water and this was caused by an insufficient insulation of the bottom of the water tray and by a re-evaporation of the distilled water in the collecting channel which had an insufficient inclination.

All the above models presented a roof inclination of about 45° and the experience of other workers has shown that better results are obtained when such inclination is lowered to 10° (25).

In 1957 a plexiglas tubular solar still (Model No. 6) was tested. It was similar to other stills tested by Howe (15, 16, 17) and Fitzmaurice (28) and gave very satisfactory results (39, 40). This solution seems one of the best, for simplicity and efficiency.

In 1958 the last model (No. 7) of this series was built. It was a vertical structure still designed for temperate zones with a high water yield for surface unit of occupied ground and a very good insulation of the four trays placed one above the other in a glass cage. As in the Model No. 6 all the external surfaces are condensing ones.

The results obtained with this unit were very interesting and showed that it was possible to obtain appreciable amounts of water in the months in which

Table 1. Characteristics of the seven models of solar stills developed and tested in the Universities of Bologna and Bari, Italy, after 1953

Model No.	Construction material		Insulation	Tray surface sq meters	Maximum water production	Approximate cost of the experiment- al unit in US	Ref.
	Water tray	Transparent roof			liters sq meters/day	dollars per sq meter	
1-1953	Plexiglas	Plexiglas	None	0.16	—	—	—
2-1953	Wood	Glass	Cork	2.5	3	60	(34) (35)
3-1953	Plexiglas	Glass	Cork	0.25	4	50	(34) (35)
4-1954 (3 units)	Iron plate	Glass	Compressed cellulose fibers	1.5 and 3	3	50	(36) (37)
5-1955	Concrete	Glass	Pumice	10	2.5	50	(38)
6-1957	Aluminum plate	Plexiglas tubular	Inner hot air	0.33	4 <sup>a</sup>	40	(39) (40)
7-1958	Aluminum plate	Glass	Inner hot air	1.08 <sup>b</sup>	3.5 <sup>c</sup>	40	(41) (42)

<sup>a</sup> The data of the amount of distilled water have been correlated with solar energy measurements and an efficiency of about 40 per cent was recorded.

<sup>b</sup> Four trays 0.27 sq meters each, assembled one above the other within a glass cage.

<sup>c</sup> The data of the amount of distilled water have been correlated with solar energy measurements and an efficiency varying between 25 and 45 per cent was recorded, according to the inclination of the sun.

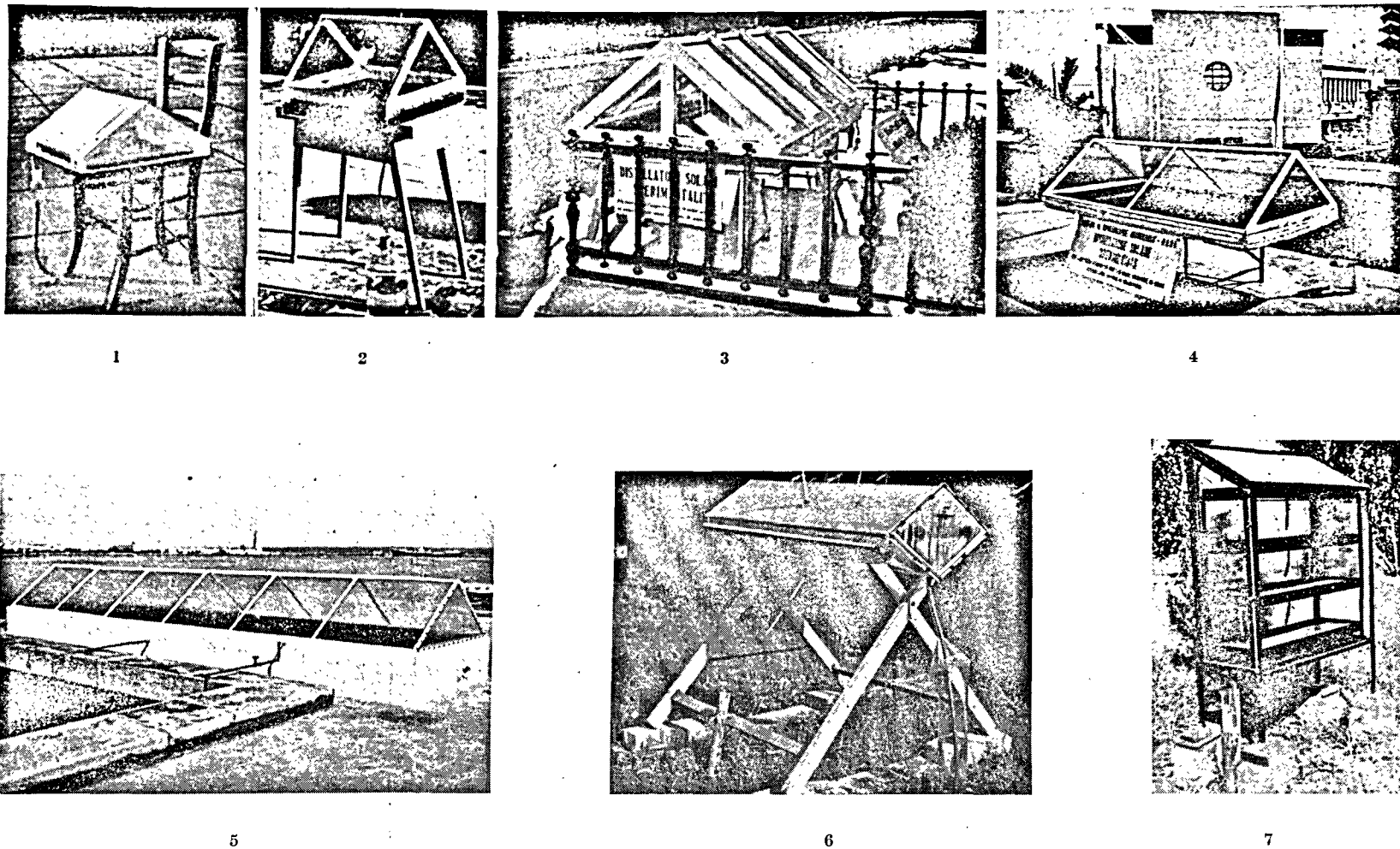


Figure 1. Photographs of the seven models of solar stills developed and tested in the Universities of Bologna and Bari, Italy, starting from 1953



the inclination of the sun is low, recovering very high percentages of the low intensity solar energy available in such months.

At the present, experimental work is developing in the field of multiple effect plastic framed solar stills.

### Future of the solar stills

A critical survey of the present knowledge in this field shows that the present models, although very ingenious, all suffer from the same drawback: the amount of water produced is little and appreciable amounts of water are available only with very large, complicated and expensive units.

The amount of distilled water varies in the range from 2 to 5 liters/(sq meter/day) in the clear days in the simple-effect stills, up to perhaps 10 to 15 liters (sq meter/day) in the multiple effect stills of best design, which must still be developed and thoroughly tested.

At present the best models require about 200 sq meters of tray surface to give one cubic meter of fresh water per day.

The cost of the solar stills (not considering the cost of the ground) per surface unit is still high even in the cheapest models. Such cost is hardly lower than US \$20 per sq meter of tray area. The solar stills present the advantage that the operation and maintenance costs are very low and the only large expense concerns the building of the unit or of the plant.

The present experience shows that, although the solar stills may not solve the problem of obtaining fresh water on a large scale, e.g., for the needs of a town, they can solve various very important individual problems in arid zones and they remain one of the most interesting, easy and efficient systems for the utilization of solar energy.

With this picture in mind one may consider the possibility of a mass production of little solar stills to be installed in deserts or in arid zones in order

to give fresh water to one or very few persons in emergency conditions.

Along this line it is interesting to study the work in Algeria done by Gomella (27) who has developed solar still units with the cement tray and with a low inclination glass cover.

Another approach to the problem is to use the solar stills as structural elements in buildings in arid zones, arranged on the roofs of the houses. The salt water is charged or pumped in the trays every 2 or 4 days and the fresh water flows by gravity in the collection tank inside the house and under the roof. The concrete solar still developed by the writer in 1955 was designed with this purpose and its operation has suggested various improvements (38).

If the distilled water is to be used for drinking purposes, it is necessary to consider the need of adding salts, possibly by mixing with a part of the saline water, and of aeration.

In any case the problem of the knowledge of solar stills is by no means closed. The literature reports designs of the present models as well as some new designs.

Some improvements may be expected by a more extensive testing of multiple effect solar stills, which so far have been tested only on a limited scale by a few workers (11, 43).

It has been reported (11) that a three-effect unit may give an amount of water double that of the single-effect unit.

Another project considers the possibility of heating the water within pipes exposed to the solar radiation and condensing the vapor in a conventional multiple effect still. This idea had already been quoted in a review by Löf (20) as well as Soviet workers (30). A detailed calculation of the efficiency of this design has appeared in the literature (44).

The knowledge gained in the experiments carried on in the past 10 years on solar stills permits us to consider the maturity of the development and the practical applicability of these designs, with the limitations outlined above.

### References

- Harding, J., Apparatus for solar distillation, Proc. Inst. Civil Engrs., London, 73: 284-8, 1883.
- Richard, J., Sur la distillation des eaux salées au moyen de la chaleur solaire, *Recherches et Inventions* 8: 474-5, 1927.
- La Parola, G., Apparecchio per la distillazione dell'acqua salmastra o marina per mezzo del calore solare, *Notiz. Econ. Cirenaica*, Bengasi, Nov., 1929.
- Boutaric, A., La chaleur solaire et son utilisation, *Chaleur et Ind.* 11: 59-66 and 147-55, 1930.
- Telkes, M., Solar distiller for life rafts, Office of Scientific Research for Defense, Report No. 5225, OTS, PB 21120, May, 1945.
- Such reports will be quoted, in the present paper, as: "OSW, RDPR".
- National Academy of Sciences, National Research Council, Washington, D.C., *Proceedings, Symposium on saline water conversion*, Publication No. 568, 1957. The reference to such publication will be shortened in the present paper to: "NAS-NRC Publ. No. 568".
- Telkes, M., Fresh water from sea water by solar distillation, *Ind. Eng. Chem.* 45: 1108-14, 1953.
- Telkes, M., Solar stills, Proc. World Symp. Applied Solar Energy, Phoenix, Arizona, 1955, 73-9.
- Telkes, M., Research on methods for solar distillation, OSW, RDPR No. 13, December, 1956.
- Telkes, M., Solar still theory and new research, *NAS-NRC Publ. No. 568*: 137-49, 1958.

12. Telkes, M., New and improved methods for lower cost solar distillation, *OSW, RDPR No. 31*, August, 1959.
13. Telkes, M., Solar still construction, *OSW, RDPR No. 33*, August, 1959.
14. Howe, E. D., Sea water as a source of fresh water, *J. Am. Water Works Assoc.* **44**: 690-700, 1952.
15. Howe, E. D., Sea water research progress report, University of California, Berkeley, Calif., September, 1953.
16. Howe, E. D., Sea water conversion program progress report, University of California, Berkeley, Calif., January, 1954.
17. Howe, E. D., Sea water conversion progress report, University of California, Berkeley, Calif., March, 1955.
18. Lappala, R. and Bjorksten, J., Development of plastic solar stills for use in the large scale, low cost demineralization of saline waters by solar evaporation, *Trans. Conf. Use Solar Energy*, Tucson, Arizona, Vol. III, Part II, 99-107, 1955.
19. Bjorksten Research Laboratories Inc., Development of plastic solar stills, *OSW, RDPR No. 24*, February, 1959.
20. Löf, G. O. G., Demineralization of saline water with solar energy, *OSW, RDPR No. 4*, August 1954.
21. Löf, G. O. G., Solar distillation of sea water in the Virgin Islands, *OSW, RDPR No. 5*, February, 1955.
22. Löf, G. O. G., Design and cost factors of large basin type solar stills, *NAS-NRC Publ. No. 568*: 157-74, 1958. This still, with a tray surface of 250 sq meters, was built at Daytona Beach, Florida.
23. Ambroggi, R., Recherches au Maroc sur la déminéralisation des eaux salines et saumâtres par distillation solaire, *Colloque UNESCO-Iran*, Teheran, 1958.
24. Barasoain, J. A. and Fontan, L., Primeras experiencias de destilación solar del agua en España, *Rev. Ciencia Aplicada* **72**: 7-17, 1960.
25. Gomella, C., Déminéralisation des eaux saumâtres par distillation solaire, *OECE Groupe de travail No. 8*, 1955.
26. Gomella, C., Practical possibilities for the use of solar distillation in under-developed arid countries, *Trans. Conf. Use Solar Energy*, Tucson, Arizona, Vol. III, Part II, 119-33, 1955.
27. Gomella, C., Solar distillation developments in the Eastern Mediterranean, *NAS-NRC Publ. No. 568*: 131-6, 1958.
28. Fitzmaurice, R. and Seligman, A. C., Some experiments on solar distillation of sea water in Cyprus during the summers of 1954 and 1955, *Trans. Conf. Use Solar Energy*, Tucson, Arizona, Vol. III, Part II, 108-18, 1955.
29. de Jong, T., An introduction to solar distillation, *J. San. Eng. Div.*, Proc. A.S.C.E., Paper 1704, 40 pages 1958.
30. Akademiya Nauk S.S.S.R., Ispolyzovanie solnechnoy energii, Moscow, 1957.
31. Wilson, B. W., Solar distillation research and its application in Australia, *NAS-NRC Publ. No. 568*: 123-30, 1958.
32. The Franklin Institutè, Producing permanently hydrophilic surfaces on plastic films for solar stills, *OSW, RDPR No. 29*, September, 1959.
33. I acknowledge the financial support by Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, by Ministero della Sanità, Roma, by Ente Turismo, Foggia, and the help and encouragement by Prof. W. Ciusa, Director of the Istituto di Meteorologia, Università di Bologna, Italy.
34. Nebbia, G., Sull'utilizzazione dell'energia solare. Nota I. *Geofisica e Meteorologia (Genova)* **1**: 100-2, 1953.
35. Nebbia, G., Alcuni nuovi studi sui distillatori solari. *Chimica e Industria (Milano)* **36**: 20-7, 1954.
36. Nebbia, G., Le ricerche sui distillatori solari, *Bol. Camera Comm. Ind. Bari* **37**: Nov. Dic., 1953.
37. Nebbia, G., Sull'utilizzazione dell'energia solare. Nota II, *Geofisica e Meteorologia (Genova)* **2**: 50-4, 1954.
38. Nebbia, G., Un nuovo tipo di distillatore solare, *Ricerca Scientifica* **25**: 1443-6, 1955.
39. Nebbia, G., An experiment with a plastic tubular solar still, *NAS-NRC Publ. No. 568*: 175-6, 1958.
40. Nebbia, G., Esperimento con un distillatore solare tubolare di materia plastica, *Macchine e Motori Agricoli (Bologna)* **16**: 83-7, 1958.
41. Nebbia, G., An experiment with a vertical solar still, *Colloque UNESCO-Iran*, Teheran, 1958.
42. Nebbia, G. and Pizzoli, E. M., Ricerche con un distillatore solare verticale, *Ricerca Scientifica* **29**: 1941-5, 1959.
43. Ginnings, D. C., Multiple effect solar still, U.S. Patent 2,445,350, July 20, 1948.
44. Battelle Memorial Institute, An investigation of multiple-effect evaporation of saline waters from solar radiation, *OSW, RDPR No. 2*, December, 1953.

### Summary

In the past ten years the problem of developing solar stills has received great attention from many workers. A list is given of the laboratories and groups more actively engaged in such studies and an outline is also given of the main goals of such research and of the scientific and technical lines followed at present.

The experience gained with the solar stills so far tried has given interesting information which is useful for the evaluation of the economics of the system and for the design of future models.

Emphasis is given to the work carried on in the Istituto di Meteorologia of the Universities of Bologna and Bari, Italy. Seven different models of solar stills have been built and tested, the results tabulated and the observed drawbacks indicated.

The present knowledge permits us to state that the solar stills cannot give fresh water for a great number of people because of the very great surface necessary to obtain appreciable amounts of water and of the very high plant cost.

Small, transportable solar stills may be built and distributed in arid zones in order to give fresh water to one or more people. Such stills might also be mass-produced.

Solar stills could also be built as structural elements on the roofs of houses or small buildings, thus giving fresh water to the inhabitants.

Other improvement can be obtained through new research, both on the thermodynamics of the system and on the use of new models and construction materials.

## ÉTAT ACTUEL ET AVENIR DES ALAMBICS SOLAIRES

### Résumé

Au cours de ces dix dernières années, le problème posé par la mise au point d'alambics ou de distillateurs solaires a reçu beaucoup d'attention de la part d'un grand nombre de chercheurs. L'auteur donne une liste des laboratoires et autres groupes qui travaillent particulièrement ces questions, ainsi qu'un aperçu des principaux objectifs de ces recherches et des orientations scientifiques et techniques actuelles.

L'expérience acquise avec les alambics solaires essayés jusqu'à présent a donné des renseignements intéressants, qui sont utiles pour l'évaluation de la valeur économique du système et la réalisation des modèles de l'avenir.

L'auteur s'attache plus spécialement au travail exécuté à l'Istituto de Merceologia des Universités de Bologne et de Bari, en Italie. Sept modèles différents d'alambics solaires ont été construits et essayés, et les résultats sont rassemblés dans une table, les inconvénients observés en étant indiqués.

Dans l'état actuel de nos connaissances, on peut affirmer que les alambics solaires ne peuvent pas fournir d'eau douce à de grands nombres de personnes en raison de la très grande surface qu'il faut pour obtenir des quantités d'eau appréciables et du coût très élevé des installations.

On peut fabriquer de petits alambics solaires transportables pour les distribuer dans les régions arides de manière à fournir de l'eau douce à une ou à quelques personnes. Ces alambics peuvent également être produits en grande série.

On pourrait également construire des alambics solaires comme éléments de la structure d'une maison, notamment sur le toit de celle-ci, ou sur le toit de petits édifices, ce qui fournirait de l'eau douce aux habitants.

On peut réaliser quelques autres perfectionnements au moyen de nouvelles recherches, tant sur la thermodynamique des systèmes en cause que sur l'emploi de modèles originaux et de nouveaux matériaux de construction.

## DEVELOPMENTS IN SOLAR DISTILLATION— UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR

*Joseph J. Strobel\**

The possibilities of utilizing solar energy for conversion of saline waters were realized early in the Saline Water Conversion Program. Since 1953 the Office of Saline Water has had projects in this field, carried out primarily by means of contracts with R & D organizations. Although efforts to produce fresh water by some means of solar distillation have been proceeding for many years, the number of solar evaporators actually produced for use is small. One practical application often referred to is a large still built in 1862 in Las Salinas, Chile, to supply water for a mining camp.

Solar distillation methods fall into two main groups: (a) those producing steam or other heated fluid, usually by means of a focusing-type collector, for use in conventional distillation equipment such as a multiple-effect evaporator unit and (b) those in which absorption of the solar energy and the evaporation of water takes place in one piece of equipment, usually with self-contained condensing surface.

One of the first solar investigations under the program was conducted by Dr. George O. G. Löf (7). He made an engineering survey and evaluation of possible methods for converting saline water by use of solar energy. His investigation indicated that the most practical way of using solar energy for saline water conversion was by means of solar distillation. It was concluded that among the numerous processes and types of equipment, those of simplest design offered the best chance of producing fresh water at the lowest overall cost.

About the same time that the Löf survey was made, Battelle Memorial Institute studied the feasibility of producing distilled water from sea water with multiple-effect evaporators using steam generated in solar collectors of the parabolic cylinder type. Although it was determined that such a system was technically feasible, it did not appear attractive enough economically to justify further work at that time.

Thus, on the basis of these initial investigations, OSW has sponsored further research with emphasis on developing non-focusing types, of simple design, in efforts to lower costs by increasing efficiency and by reducing costs of the equipment and operation.

Distillation by means of solar heat has the advantage of eliminating the cost of fuel energy otherwise

required. The diffuse nature of solar energy, however, makes necessary the use of large areas for collection. Research has indicated that for solar stills to be economically practicable they must have (a) simple design, (b) low initial cost, (c) long life, (d) little maintenance expense, and finally, require minimum operating labor.

A need exists for two types of solar distillation equipment — small stills (some portable) and large-capacity stills. Small-still capacity would be in the range of twenty to several hundred gallons per day of fresh water. Such small stills would be most useful where other methods are more costly or impracticable. There have been various small solar stills designed, and they are in use in various areas. The primary objective of this paper is to deal with solar stills of large capacity, which must compete with other distillation processes, and to present information and data that has led to a practical, economically feasible design for a solar distillation plant up to 100 000-gpd capacity. Such a solar still should be found most useful in arid regions where solar intensities are high, conventional fuel costs high, and land costs low. Such stills also have attractive possibilities in areas that lack industrial development but where stills can be constructed, operated, and maintained with materials and labor available in the locality.

In earlier research on solar distillation, various design approaches had been investigated. Very small models were used, usually in places where sea water was not available and often in places of relatively poor sunshine. It became apparent to OSW that a need existed for a distillation program at a seashore location.

The Department of the Interior established a solar distillation research station at Daytona Beach, Florida, in 1958, to provide a field installation for integrated solar-still development programs where small pilot plants or equipment prototypes of various designs could be installed, operated, and further developed. It was believed that emphasis was needed on engineering aspects and on obtaining reliable data on construction, operation, maintenance, and life expectancy of different types. The station has been established and operated through a research and development contract with Battelle Memorial Institute.

Since that time, a 2 500 sq ft, glass-covered, deep-basin still and two air-supported plastic stills of

\* Chief, Division of Processes Development Office of Saline Water, Department of the Interior, Washington, D.C.

500 and 2 300 sq ft have been constructed and operated for periods of more than 1 year (1, 4). The deep-basin still was based upon L6f's design, and the plastics still was based upon Du Pont design, with their co-operation in furnishing materials and construction assistance.

Additional research on other designs such as tilted stills, suspended envelope-type stills, and stills with external condensers has been carried out under other contracts. New pilot units, based upon some of the research results, are being installed at the research station for evaluation and further development. Evaluation of various plastics materials is also under way.

The first two approaches taken at Daytona Beach for developing improved solar stills involved the use of the basin-type concept. One of these makes use of low-cost conventional construction materials such as concrete and glass, which have very long life and low maintenance. The other was the use of new transparent plastics materials, which resist solar degradation, in designs that make use of thin films and offer possible lower initial cost.

Extensive instrumentation at the Daytona Beach site, particularly on the glass-covered, deep-basin still, made possible energy-balance runs that produced much valuable information. Results of the performance tests show that productivity of the basin-type stills was almost entirely dependent on intensity of solar radiation and that it was not affected appreciably by other weather conditions. There was little difference in the performance of the deep-basin and air-supported stills when both were in good operating condition (free of vapor or distillate leaks). Overall thermal efficiencies<sup>1</sup> were in the 35 per cent range with an average solar radiation of 2 000 btu/sq ft/day

<sup>1</sup> See appendix for method of calculating efficiency.

and average productivity of 0.09 gal/sq ft/day (table 1). Productivity increased threefold when solar radiation increased twofold from 1 000 to 2 000 btu/sq ft/day. An example of the distribution of solar energy on the glass-covered deep-basin still during a 3-day period in October 1959, when average solar radiation was 1 400 btu/sq ft/day, follows:

	Percent of solar radiation
(a) Evaporation of distillate (efficiency) . . . . .	32
(b) Ground and edge heat losses . . . . .	2
(c) Solar radiation reflected from still . . . . .	11
(d) Solar radiation absorbed by cover . . . . .	4.5
(e) Radiation from basin water to cover . . . . .	26
(f) Internal convection . . . . .	8
(g) Re-evaporation of distillate and unaccounted-for losses . . . . .	16.5
	100.0

Studies of this still showed that the cost of construction could be reduced substantially through design improvements, and the useful life of the still could be increased, possibly to 50 years. An improved basin still along these lines was completed in April of this year (1961), and details are given later in this paper. Using the OSW procedure (11), modified for solar, estimates of the total cost of fresh water on a 100 000-gpd still would be about \$2.50 per thousand gallons, based upon this improved design and further optimization. Battelle Memorial Institute estimates, on the basis of a municipally owned installation, give present water costs of \$2.44, with a prediction of further optimization to reduce the cost to \$1.22.

The experimental work at Daytona Beach on the use of plastics confirms the promise of the technical and economical feasibility of these types of solar stills; beginning in 1959, further developments of

Table 1. Distribution of solar radiation incident on deep-basin still

	Dates of 3-day performance runs		
	Dec. 16-18, 1959	Oct. 7-9, 1959	May 18-20, 1960
Average solar radiation, btu/(sq ft) (day) . . . . .	756	1 400	2 318
Average air temperature, F . . . . .	76	79	77
Average cover temperature, F . . . . .	71	89	98
Average brine temperature, F . . . . .	82	102	111
Average productivity, gal/(sq ft) (day) . . . . .	0.021	0.051	0.105
	<i>Per cent of solar radiations</i>		
Components :			
Reflection . . . . .	11.8	10.7	11.8
Absorption by glass cover . . . . .	4.1	4.6	4.4
Net radiation from water . . . . .	36.0	26.4	16.9
Internal convection . . . . .	13.6	7.9	8.4
Ground and edge losses . . . . .	2.1	1.6	3.5
Distillation . . . . .	24.5	32.2	40.5
Re-evaporation and unaccounted-for losses . . . . .	7.9	16.6	14.5
	100.0	100.0	100.0

NOTE. — Energy resulting from heat storage in brine was divided proportionately among net radiation, distillation, and internal convection.

plastics-covered basin stills was undertaken by E. I. Du Pont de Nemours & Company at a site near Miami, Florida. The results of those further developments will be reported by Du Pont (11, 12).

### Solar Research Distillation Station

The station was established in 1958 on land made available by the US Coast Guard; it is on the Ponce de Leon Lighthouse Reservation near Port Orange, Florida. The location is well suited to the objectives of the research program. For much of the year the weather is clear, with high-intensity solar radiation. Seasonal variations allow evaluation of the stills, however, under many operating conditions. Yearly data from records of the US Weather Bureau follow:

(a) Average temperature . . . . . °F	70.5
(b) Average precipitation . . . . . inches	51.2
(c) Average relative humidity . . . . . per cent	80.0
(d) Average windspeed . . . . . mph	9.3
(e) Prevailing wind direction . . . . .	SSW
(f) Average cloud coverage . . . . . per cent	57
(g) Per cent of possible sunshine . . . . .	62

Figure 1 is an aerial view of the Lighthouse Reservation; also shown are the Atlantic Ocean and the Halifax River. The sea-water supply from the Halifax River at the point of intake has a salinity of about 35 000 ppm.

Figure 2 is a plot of Ponce de Leon Lighthouse Reservation.

Figure 3 shows test site from top of lighthouse; the deep-basin still, inflated plastic stills, feed-water storage tank, and instrument shelter are shown.

#### DESCRIPTION OF STILLS (1)

##### *Deep-basin still*

The deep-basin still was designed initially by Dr. Löf. As constructed in Florida, the still consists essentially of a watertight, multiple-channel basin,

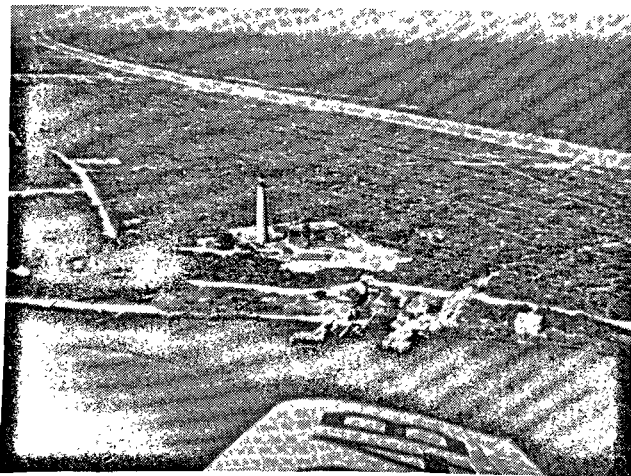


Figure 1. Aerial view of Lighthouse Reservation

placed on level ground and covered with glass plates sloping at a low angle. The design utilizes a so-called deep basin that allows a water depth of 12 inches. The principle of operation is to utilize the thermal inertia of the large mass of water to provide continuous distillation, even during the night. The design calls for placement of the basin directly on the ground, with no thermal insulation, on the premise that heat losses to the dry earth would be small.

The overall dimensions of the still are 55 by 55 feet. This provides approximately 2 450 square feet of basin area in six bays. The feed-water inlets and the blowdown overflows are so arranged that the flow of water in the basin is in three circuits. The nominal depth of feed water or brine residue in the still basin is 12 inches, although this depth may be changed as desired.

The cover of each bay consists of two rows of 4-ft-sq glass panels arranged in gable-roof fashion with a slope of 15°. The upper edges of the glass panels are supported by timber-framing members and sealed with a neoprene channel; the lower edges are supported on the bay walls and sealed with neoprene extrusions; spaces between the glass panels are sealed with pressure-sensitive tape. Figure 4 shows the completed deep-basin still. Figure 5 is a cross-sectional diagram of one bay of the still; blowups show how the glass is sealed.

#### RESULTS

After some problems were overcome the still was operated successfully for long periods. A summary of distribution of incident solar energy is given above. Details of productivity, heat flows, and temperature of still during a 72-hour period are shown in figure 6.

There were difficulties with the original distillate troughs because of leakage back to the brine and leaks in parts of the prefabricated asphalt mat liners. There was considerable difficulty in obtaining seals between glass panes that would withstand weathering. It was necessary to use a black pressure-sensitive tape (Johns-Manville, V-10, 2 inches wide). Three-sixteenths-inch glass was used in four of the six bays as a precaution against high winds occasionally occurring in northern Florida. One-eighth-inch-thick glass was used in the other two bays. Experience has shown that the 1/8-inch-thick glass is satisfactory. In fact, the still went through a severe hurricane in the fall of 1960 without damage.

Other conclusions reached on the basis of experience in operating the still are:

(a) It is not worthwhile to provide for continuous flow of brine. Batch operation is satisfactory and has the advantage of simplicity in operation and control.

(b) With solar-radiation intensities of 2 000 btu/sq ft/day, productivity of at least 0.10 gal/sq ft/day is possible.

(c) Heat losses to the ground are so small that use of thermal insulation is unnecessary.

(d) Sealing techniques require further improvement.  
 (e) Several design improvements should be possible to lower construction costs and improve performance. (These are discussed in the section Improved Basin Still.)

(f) The largest loss of incident solar energy is by radiation from basin water to cover. Reduction of radiation by some means would increase solar-still efficiency; one suggestion is a cover material that would reflect radiation emitted by the water surface.

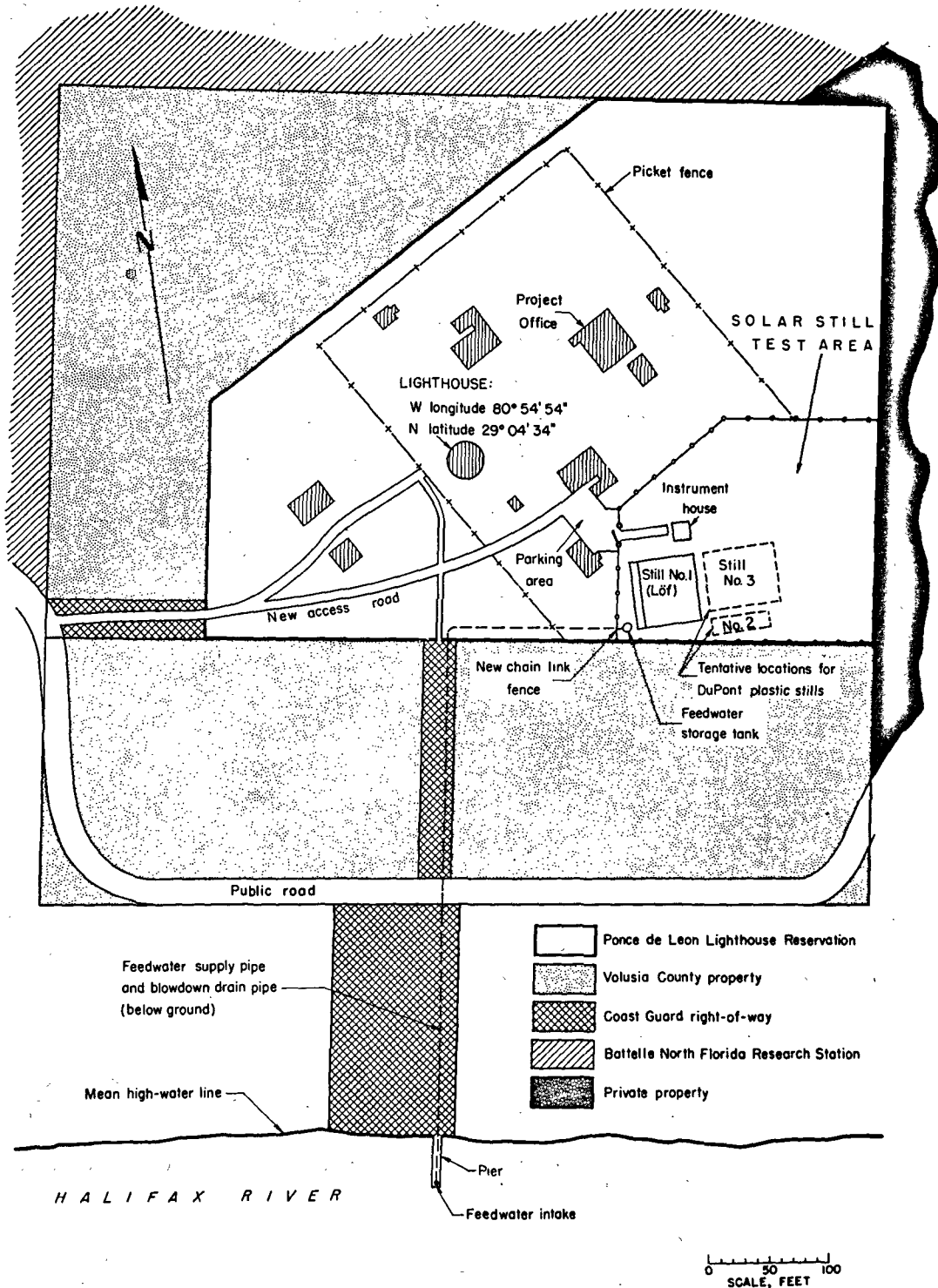


Figure 2. Plot of Ponce de Leon Lighthouse Reservation showing location of solar still test area and other facilities

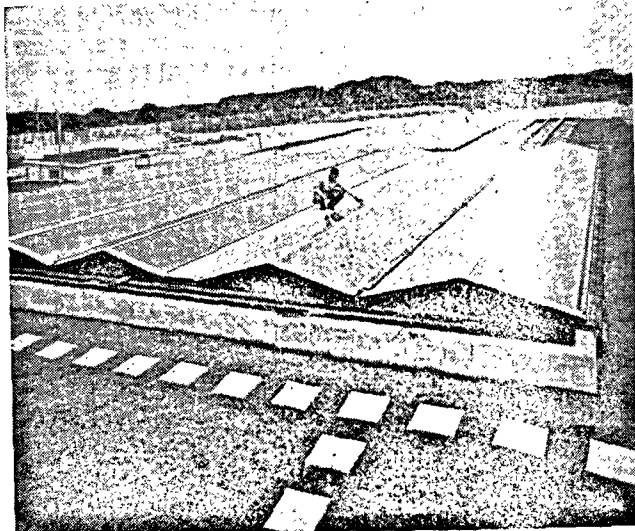
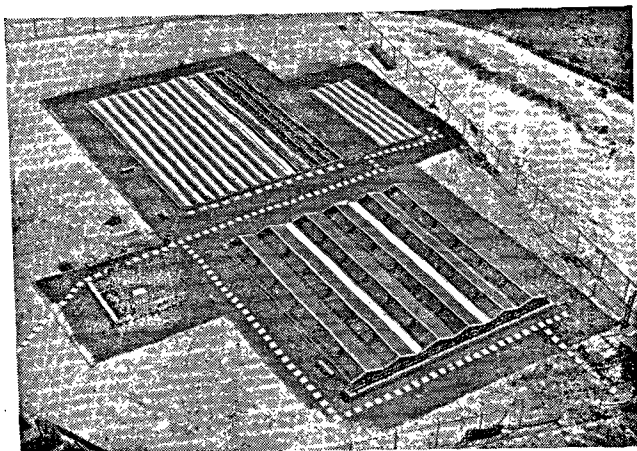


Figure 3. Solar still test area as seen from top of lighthouse

Figure 4. Completed deep-basin still

Table 2 is a summary of the construction features of the L6f deep-basin still and the Du Pont plastics still.

Theoretical analyses of energy balances (8, 9) on solar stills, by L6f, Eibling, and Bloemer, compared with actual performance data, show the importance

and relationship of various parameters in basin solar stills. Major conclusions are:

- (a) The performance of basin-type solar stills under varying atmospheric conditions and operating

Table 2. Summary of construction features of experimental solar distillation plants

Still	Unit 1, L6f deep-basin still	Unit 2, small Du Pont plastic still			Unit 3, large Du Pont plastic still		
Approximate total basin area, sq ft.	2 450	500			2 300		
Cover material	Glass panels	3-mil Teslar film			5-mil weatherable Mylar film		
Over-all dimensions of structure	55'2" x 55'7"	16'5" x 38'3"			49'9" x 63'5"		
Over-all area of structure, sq ft	3 069	628			3 157		
Number of bays	6	5			15		
Feed-water flow for filling and purging	Adjacent bays in series, 3 pairs in parallel	5 bays in series			15 bays in parallel		
Feed-water control	Controlled as a unit, either batch or continuous	Batch controlled as a unit			Each bay batch controlled separately		
Inside bay dimensions	7'9 1/2" x 51'11 1/4"	2'8" x 37'2"			2'6" x 62'4"		
Basin area of each bay, sq ft.	408.8	99.1			155.6		
Curb centerline spacing	8'5 1/8"	37"			39"		
Basin and curb slope, each bay, in./ft.	0.028	0.072			0.095		
Minimum and maximum water depth when purging, inches	May be controlled at any point in the range 7 to 11 inches	Bay	Min	Max	Section	Min	Max
		1	0 <sup>a</sup>	3 1/2	Upper	1 1/2	3 1/2
		2	0	2 1/2	Center	1 1/2	3 1/2
		3	0 <sup>a</sup>	2 1/2	Lower	2	4
		4	0	2 1/2			
		5	0	2 1/2			
Wall or curb construction	Concrete block laid on poured concrete footers	End and side curbs, poured concrete			End curbs poured concrete; side curbs lintel block with poured concrete contours		
Treatment on cover condensing surface	Untreated	Untreated			11 bays untreated, 4 bays wet-tably treated		
Cover support	Panels supported on framing	Air supported (approx. 1/4-in water gage pressure)			8-mil Black Alathon-5F polyethylene resin film		
Basin liner	1/4-in prefabricated asphalt mat on bottom, 1/4-in on sides	8-mil Black Alathon-5F polyethylene resin film			2 in of perlite loose-fill insulation		
Bottom insulation	None	4-mil Alathon-14 polyethylene resin film			Impregnated Celotex sheathing, 1/4-in each bay		
Ground sheet	None	Black Orlon acrylic fiber mat					
Side insulation	2 in foamglass, perimeter only						
Radiation-absorbing surface	Asphalt liner						

<sup>a</sup> Water does not cover entire bay because of slope of basin.



methods and with various design features may be appraised by the solution of theoretical energy-balance equations. Because even the simplified equations involve more than a dozen variables, analysis by digital computer methods is practically required. Determination of the ranges and representative values of most of the parameters is facilitated by use of pilot-plant data.

(b) Results of the computer analysis, in the form of graphical relationships between hourly distillation rate, basin temperature, cover temperature, and 11 design and operating variables, show the following principal effects :

1. High distillation rates are accompanied by high temperatures and relatively small temperature differences between basin and cover.
2. Distillation rate and operating temperatures increase with increase in solar radiation, atmospheric temperature, and degree of approach to equilibrium in the distiller. Productivity and temperatures rise with decrease in wind velocity (external coefficient of heat transfer), reflectivity of the system, ratio of cover area to water area, and re-evaporation and reflux of condensate.
3. Effects of moderate changes in the size of structural components and transmissivity of the cover for solar radiation are small.

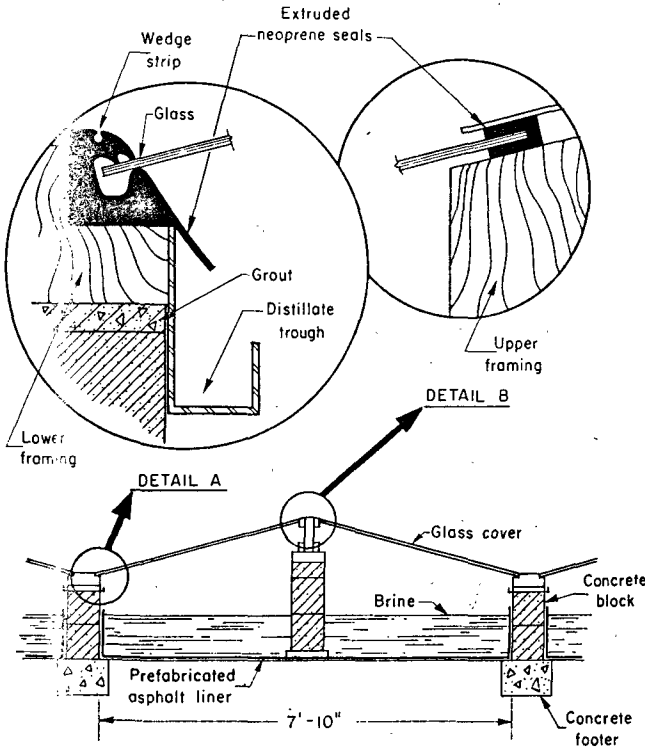


Figure 5. Typical cross-section of glass-covered, deep-basin still

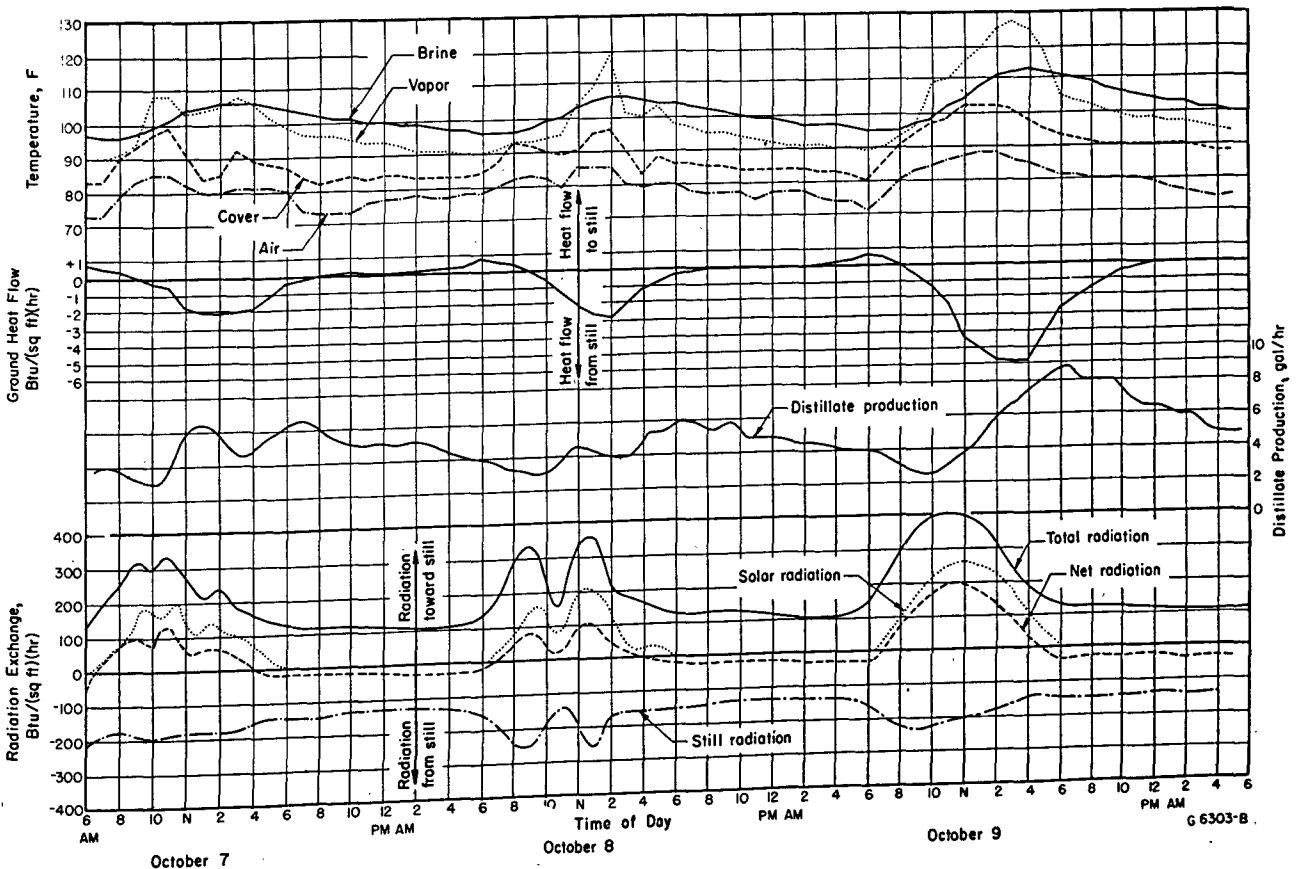


Figure 6. Productivity, heat flows, and temperatures of deep-basin still during 72-hour period

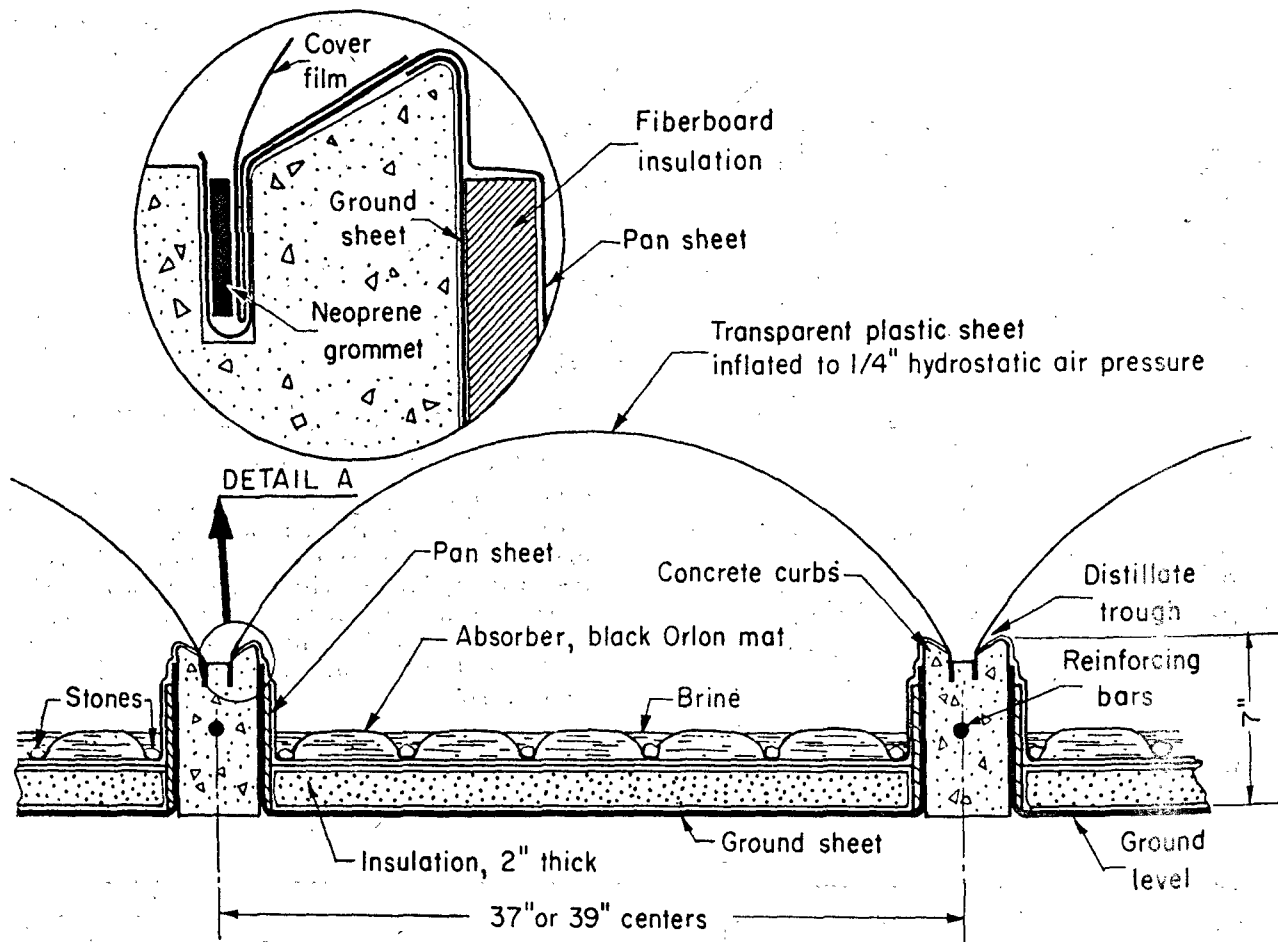


Figure 7. Cross-sectional elevation showing basic construction of inflated plastics stills

#### *Air-supported plastics stills*

The stills were built with the co-operation and assistance of E. I. du Pont de Nemours & Company, which also supplied the plastic materials. Frank E. Edlin, of Du Pont, designed the stills and assisted in installation and construction techniques.

The stills consist of separate channels provided with plastics film basins and air-supported transparent plastics covers. Relatively shallow basins having  $1\frac{1}{2}$  to 4 inches of water are used. The 500-sq-ft unit has five bays and the 2 300-sq-ft unit, 15 bays.

Figure 7 shows the basic construction of one bay of the plastics stills. A plastics pansheet contains the feedwater in the basin, and a transparent plastics cover serves the dual purpose of transmitting the solar radiation and providing a condensing surface for the vapor. The cover film is supported by air pressure, supplied by a small blower. Concrete curbs constitute the side walls of the basin and also an anchor for the pansheets and cover film.

The stills are operated batchwise, with feedwater makeup and purging of brine residue scheduled at intervals of approximately one week. The 15 bays of the large unit are arranged for parallel flow, so that the individual bays can be controlled separ-

ately. Du Pont Teslar film, of 3-mil thickness, was used for the cover on the small unit, and 5-mil Du Pont weatherable Mylar was used on the large unit. Properties of plastics films are given in table 3.

#### RESULTS

The large air-supported still was operated from January 1959 until September 1960. The small still was operated from January 1959 until September 1959. Instrumentation was not nearly as complete as for the deep-basin still; however, it was sufficient for determining productivity and evaluating the components of energy balance. Production was roughly equivalent to that of the deep-basin still (for bays that did not leak vapor). It was learned that air support of thin films was a practical means of solar-still construction. A major lesson was that such plastics units should be prefabricated so that joining and sealing is avoided in the field. The major problem in using plastics is insuring vapor tightness. With present sealing techniques, this does not appear practical for field installations; the prefabricated types were, however, satisfactory from the standpoint of vapor tightness.

The weatherability of plastics is also a problem. Some of the newer plastics films apparently will have

Table 3. Properties of Du Pont weatherable films used on plastics stills

	Film	
	Teslar film, 300 sq ft still	Weatherable Mylar polyester film, 2 300 sq ft still
Status of film . . . . .	Experimental (1960)	Semi-commercial
Thickness used on experimental stills, mils . . . . .	3	5
Density, g/cc . . . . .	1.38	1.38
Sq ft/lb (1 mil) . . . . .	140	140
Cost, cent/sq ft/mil		
Present . . . . .	—	2.3
Projected . . . . .	1-2	1-2
Estimated outdoor life in Florida, years <sup>a</sup> . . . . .	7-10	3-5
Tensile strength, 10 <sup>3</sup> psi . . . . .	14	24
Tensile modulus, 10 <sup>3</sup> psi . . . . .	300	600
Elongation, per cent. . . . .	100	110
Tear strength, g/mil . . . . .	20	20
Flex cycles (1 mil) . . . . .	100 000	20 000
Moisture-vapor transmission, g/100 m <sup>2</sup> /hour/mil . . . . .	180	110
Oxygen transmission, g/100 m <sup>2</sup> /hour/mil . . . . .	0.4	0.4
Use temperature, F		
Upper . . . . .	250	250
Lower . . . . .	— 100	— 60
Chemical resistance . . . . .	Excellent	Good
Solar-energy transmission, per cent. . . . .	95	85
Refractive index . . . . .	1.47	1.65
UV transparency . . . . .	Yes	No
Heat sealability . . . . .	Yes	No

<sup>a</sup> Not exposed to excessive temperature or humidity.

satisfactory life. Of the ones tested, a polyvinyl-fluoride type, is the most satisfactory. The use of plastics films for the condensing surfaces has the further problem of wettability. Condensate forms in droplets and interferes with the passage of solar radiation. A means of insuring film-type condensation when the films are used in this manner appears advantageous.

Figure 8 shows measurement on one adequately sealed bay of the large Du Pont still during a 72-hour energy-balance run. Operation of these stills showed that even though the depth of water in the basin is small, if the solar still covers a large area the use of bottom insulation is probably unnecessary and not economically justified. During hurricane Donna, which struck the Florida station in September 1960, all but two plastics bays were torn beyond repair; however, the stills withstood the storm without damage when inflation was maintained.

Based upon the results obtained and the experience and knowledge gained through operation of these units, the Du Pont Company proceeded to develop improved designs and established a solar-energy development center near Miami, Florida. Improved results have been reported to OSW informally, and it is expected that publication will be made at the appropriate time by the Du Pont Company.

#### Tilted stills

Several research contracts were carried out by Dr. Maria Telkes. One of the results was the development of tilted-type solar stills (13, 14). Curtiss-Wright

Corporation incorporated design improvements; they fabricated five 100-sq-ft stills for evaluation at the Daytona Beach station. The stills consist of modules each 25 sq ft; thus a 100-sq-ft still consists of four of the modules. Stills face south and are tilted about 30°. The general design features of all are the same, but they vary in types of transparent covering, pan materials, etc. Combinations of Teslar, Mylar, and Polykraft pans and Teslar, glass, and Mylar covers are being evaluated.

Figures 9 and 10 show the tilted still; it is essentially a black absorbent fabric supported at an angle from the horizontal by an impermeable sheet of plastics or metal and surrounded by a transparent cover above and an opaque material below. The units constructed at the Florida station were assembled with redwood framework and steel angle-iron supports. Preliminary results indicate good performance with somewhat greater productivity as compared with the basin-type still.

Practical difficulties, however, are becoming apparent; these include deterioration of wick materials, controlling flow of feed streams, shrinkage or wrinkling of some pansheets, and leakage of brine and distillate.

The performance of the tilted still is encouraging and can be made satisfactory; however, it is questionable that this type of design and construction would be as practical and economical for large-size solar stills as a basin-type design. It would appear that this type of still would be most useful for smaller units.

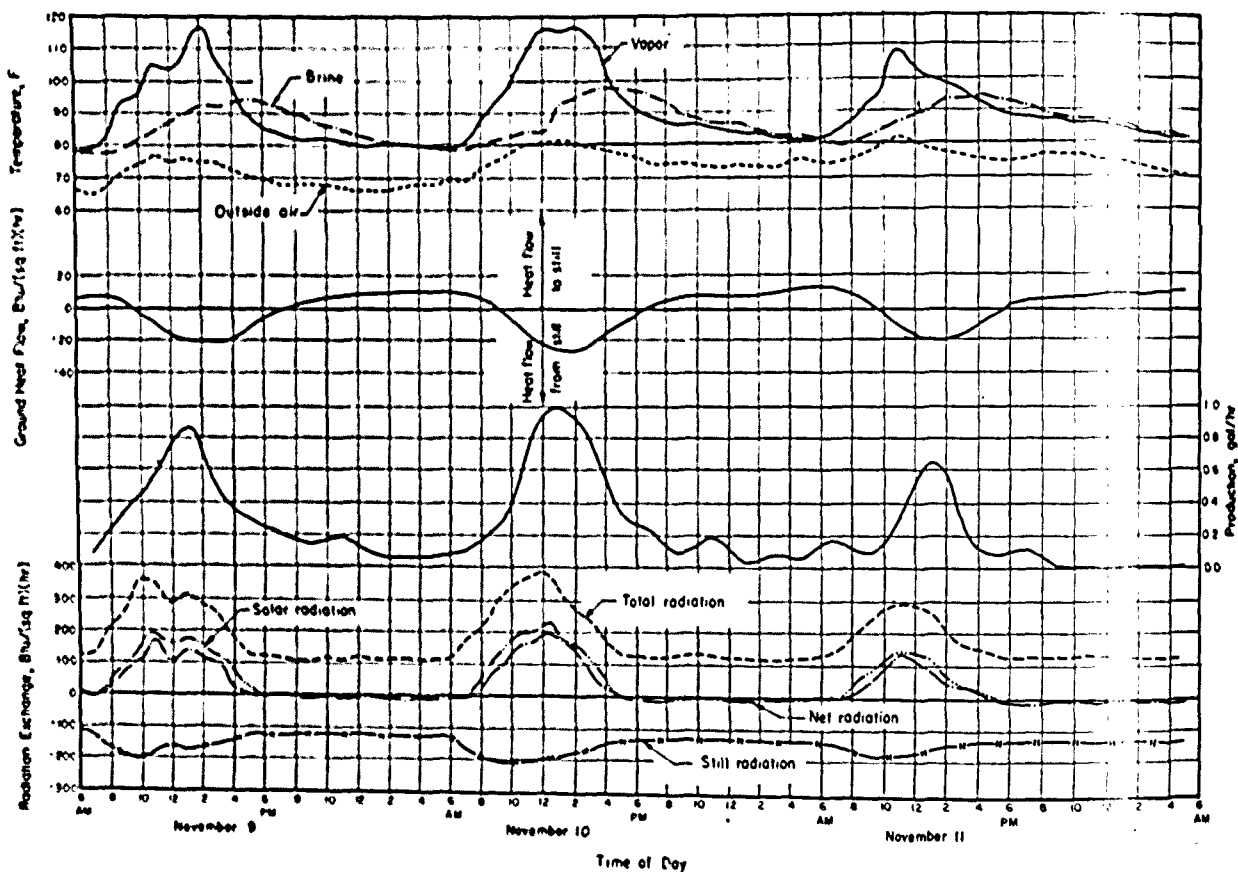


Figure 8. Radiation exchange, ground-heat flow, productivity, and temperatures of Bay 14 of large Du Pont still during 72-hour energy-balance run

### *Suspended envelope still*

The Bjorksten Research Laboratories have been investigating the use of plastics materials in solar stills (3). One result was a design for a suspended envelope-type construction. Such stills consist essentially of an envelope separated from but surrounding an absorbent evaporating surface. The framework along the top is provided with a channel to allow saline water to flow slowly from the top down along the evaporating surface. The excess brine and fresh water are collected in separate channels along the bottom of the still. The stills are suspended by steel cable or other means from posts set in the ground and operated in close to vertical position.

During the past year the Bjorksten laboratories have been working on designs and production of six 100-sq-ft stills for testing at the solar station. These units are based upon the module concept, each approximately 15 feet long and 8 feet wide. Figure 11 shows the basic construction of the envelope-type units. Difficulties in operating the units produced so far have delayed production data. These difficulties include insufficient resistance to wind, improper wettability of wick material, and covering film being blown against wick and contaminating distillate.

### *Basin stills with external condensers*

For several years the Georgia Institute of Technology has been investigating the use of forced convection combined with external condensers in basin-type solar stills. The experimental work has been done on table-model solar stills, and the new design and natural-convection, shallow-basin stills have been compared. Figure 12 shows the experimental equipment installed on the roof of a building at Georgia Tech.

In these designs, air is continuously blown through the still and externally dehumidified in a tubular condenser cooled with incoming feed. Part of the preheated saline-water feed enters each still directly — the remainder is stored in the basin of the still or in a separate tank for night-time use—and is dispersed through a nozzle or over packing slats to increase the rate of evaporation. The tubular condenser can be replaced by a contactor into which a portion of the product, previously cooled in a tubular heat exchanger with saline-water feed, is sprayed to dehumidify the air-vapor mixture. The dehumidified air can be recycled to the still.

The analysis of forced-convection stills is complicated by a greater number of variables. There seems to be a definite optimum airflow rate, depending

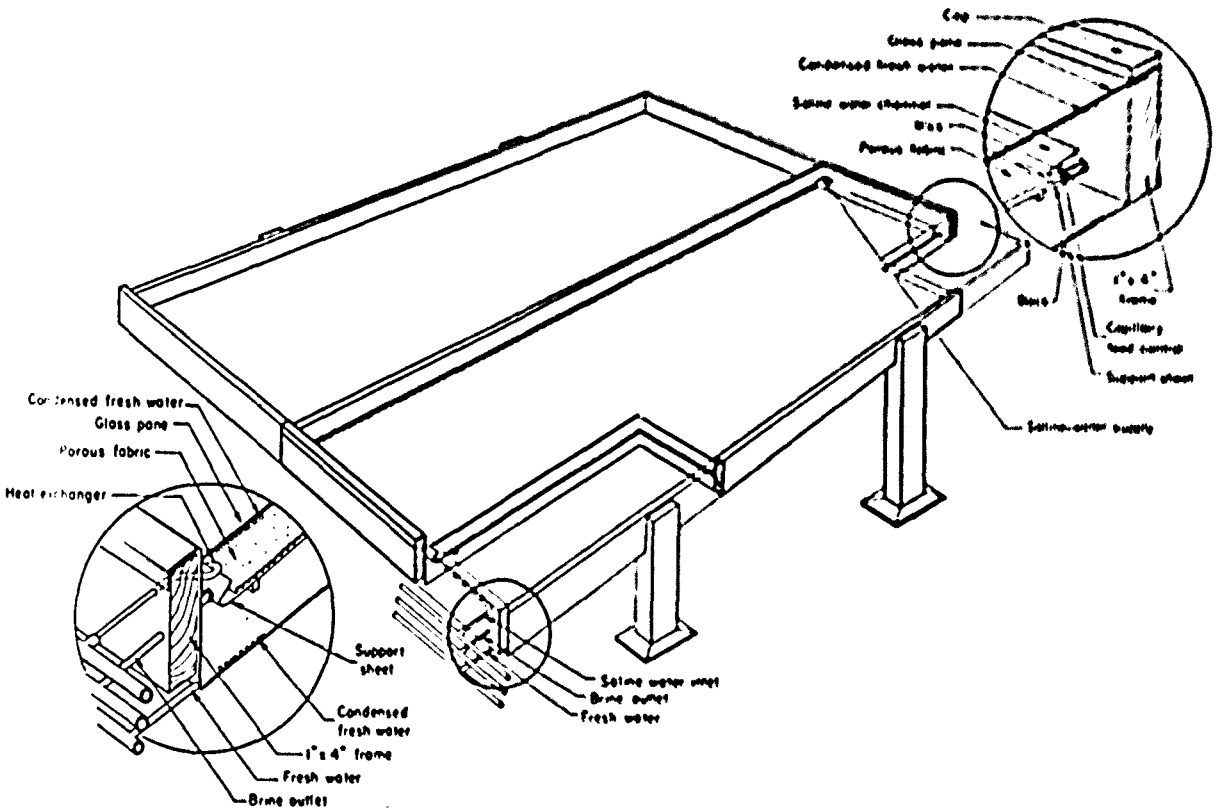


Figure 9. Telken tilted still

on atmospheric conditions. When operating below this optimum rate, production decreases rather sharply. Operation near the optimum airflow rate, for a still with an increased water-surface area, showed that production of 0.18 gal/sq ft/day can be obtained with solar radiation at 2 000 btu/sq ft/day. However, part of this production is obtained by extraction of water vapor from the ambient air by the condenser and from solar energy gained from the piping and

blower. In the small still used, these factors may contribute as much as one-third of the total production.

Based upon OSW standardized procedure, Georgia Tech. estimates costs for 100,000 gal of about \$4.00 per thousand gallons under existing conditions and about \$2.50 per thousand gallons as predictable future costs. With modification of the cost-estimating procedure to reflect simplicity of solar stills, the

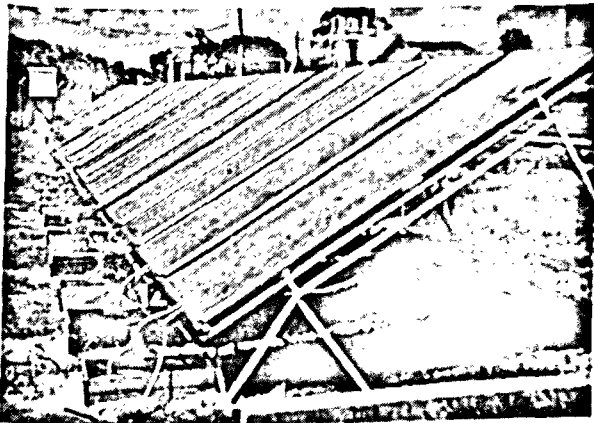


Figure 10. Tilted still installed at solar distillation research station

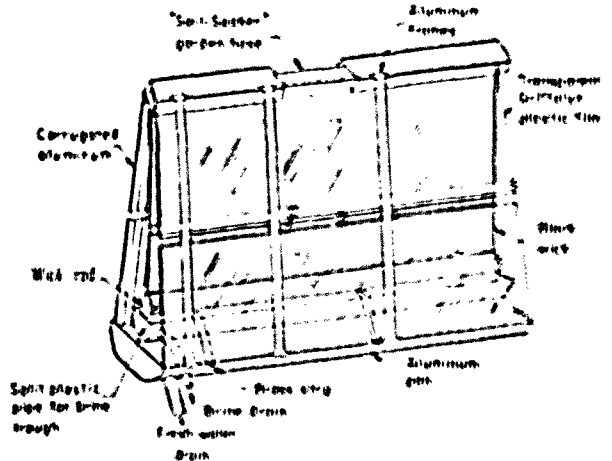


Figure 11. Njorksten envelope still, Mark III and IV type

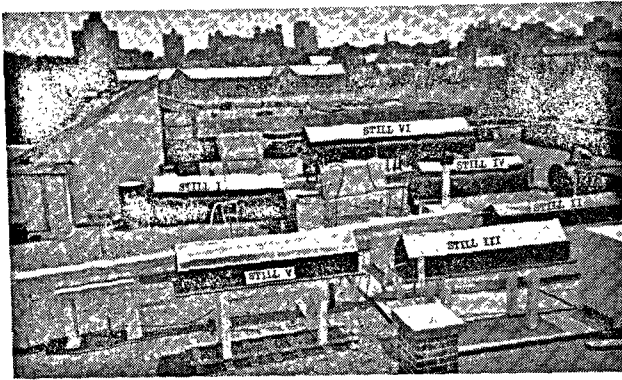


Figure 12. Overall view of experimental stills at Georgia Institute of Technology, 1960 season

Still 1. Deep basin; natural convection; Mylar; Still 2. Shallow basin; forced convection; Mylar; Still 3. Shallow basin; natural convection; Teslar; Still 4. Deep basin; forced convection; Mylar; Still 5. Shallow basin; natural convection; glass; Still 6. Deep basin; forced convection; Teslar

previous cost figures are lowered to \$3.48 and \$2.15, respectively (6).

#### Improved basin still

The several years' experience, including design, construction, modification, and operation of glass-covered basin stills has led to a new design of greater simplicity with expected greater still life and less maintenance. A new still having a 3 000-sq-ft single basin was begun in January 1961. The basin liner consists of prefabricated asphaltic mat without submerged perforation. All support columns for the glass rest directly on the liner. Special concrete beams support the glass and simplify sealing. The major phases of construction include (a) grading, (b) installation of asphaltic mat, (c) erection of concrete blocks and beams, and (d) installation of glass and distillate troughs. The still is not instrumen-

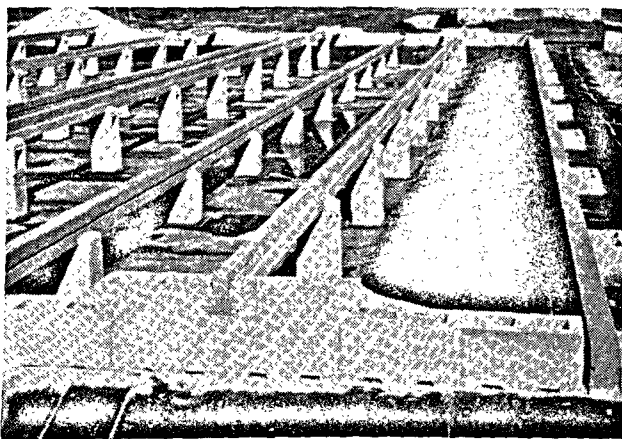


Figure 13. Improved glass-covered basin still being installed at Solar Distillation Research Station

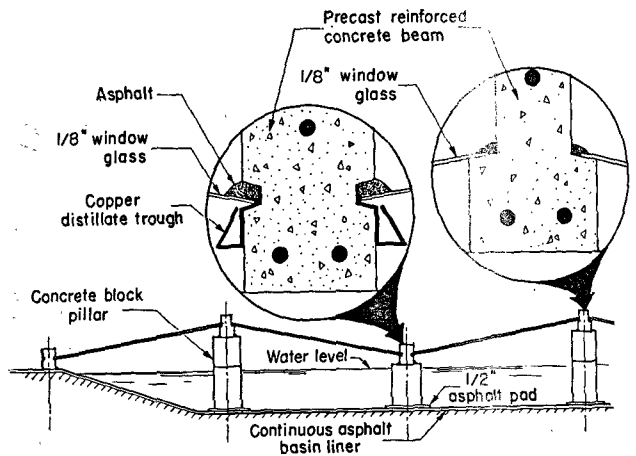


Figure 14. Typical cross-section of improved glass-covered, deep-basin still

ted as extensively as the first deep-basin still; instead, only a few thermocouples were placed at strategic locations to indicate still performance. A recording dump-type water meter is used to measure distillate output and brine overflow rates.

The preliminary cost estimate for this still was \$1.26 per sq ft, completely installed, i.e., 81 cents for material and 45 cents for labor. When some actual costs were obtained during construction of the still, the cost increased to \$1.84 per square foot — materials at 91 cents and labor 93 cents. (This compared with actual cost of \$7.00 per square foot for the original deep-basin still built at the Daytona Beach site.) The largest increase was in grading and compacting the soil base—essentially a hand-labor operation for this small size. The cost break-down for the new still is given in table 4. Figure 13 shows the still near completion. Figure 14 is a cross section of the new still design. Details of construction are given in drawings in the appendix (figures 15, 16, 17 and 18). Operation of this still is expected to begin in May 1961.

Several cost estimates have been made, based upon the data obtained from the glass-covered, deep-basin stills. Battelle Memorial Institute made estimates on a 100 000-gpd still, based upon a municipally owned plant. Assuming a \$1.37-sq-ft cost installed and production estimated at 0.09 gal/sq ft/day at solar radiation of 2 000 btu/sq ft/day, their estimate is \$2.44 per thousand gallons. On an optimized basis of \$0.99-sq-ft cost and 0.11 production, their estimate is \$1.22 per thousand gallons.

Further estimates have been made by OSW, based upon the standardized procedure modified for solar application. For a 100 000-gpd still, present cost per thousand gallons per day of product water is \$3.25, based upon \$1.37-sq-ft cost installed and 0.10 gal/sq ft/day production. A projected estimate, based upon further optimization, is \$2.06 per thousand gallons, using \$1.00-sq-ft cost installed and 0.12 gal/

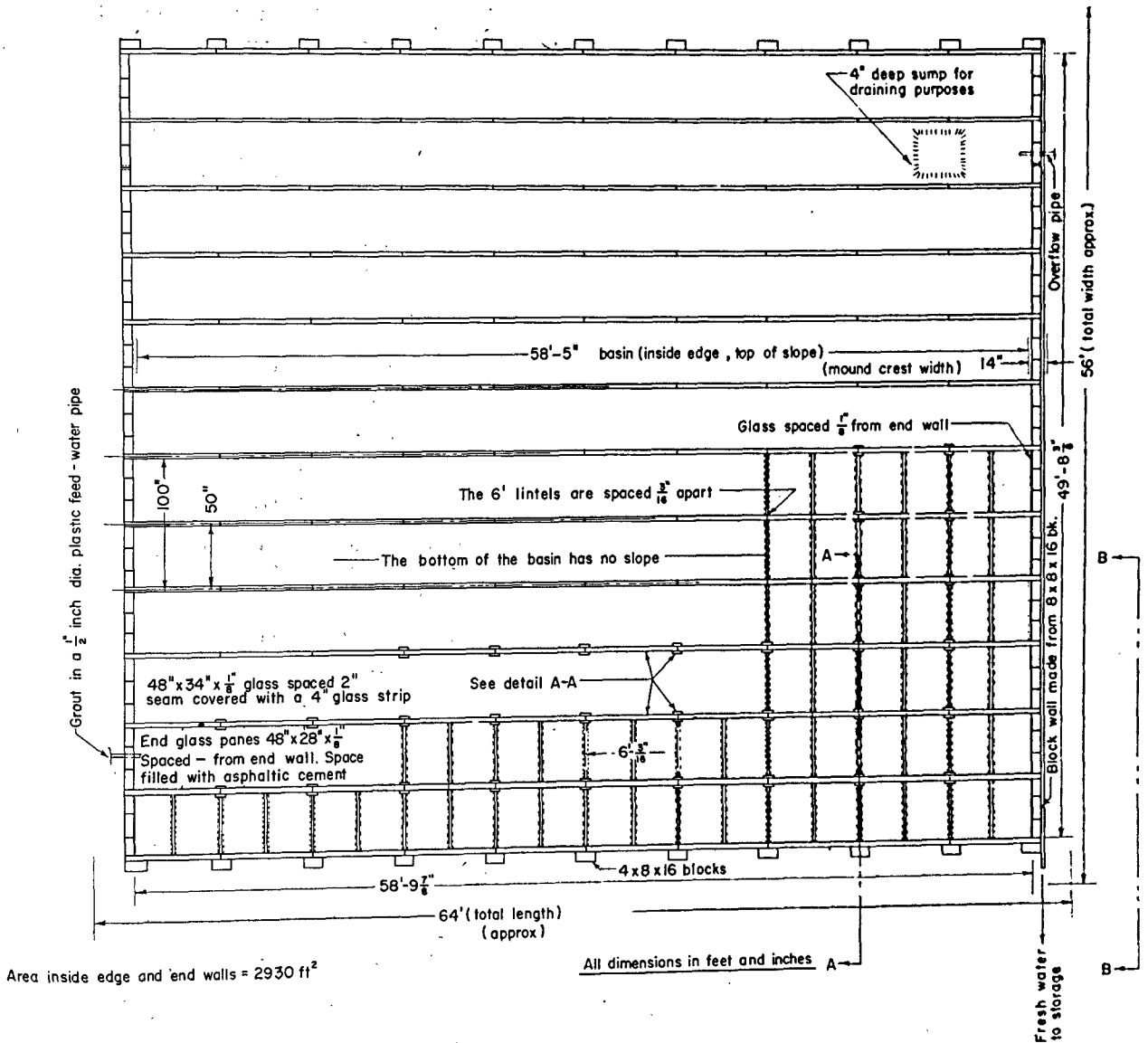


Figure 15. Improved glass-covered basin still. Drawing No. 1

Table 4. Estimated cost break-down of new deep-basin still

Item	Cost, dollars/ sq ft		
	Labor	Material	Total
1. Layout, grading, soil sterilization .	0.28 <sup>a</sup>	0.04 <sup>a</sup>	0.32 <sup>a</sup>
2. Asphalt-mat basin liner . . . . .	.17 <sup>a</sup>	.28 <sup>a</sup>	.45 <sup>a</sup>
3. Concrete blocks for pillars and edge walls. . . . .	.06 <sup>a</sup>	.04 <sup>a</sup>	.10 <sup>a</sup>
4. Concrete lintels . . . . .	.22 <sup>a</sup>	.13	.35
5. Glass . . . . .	.13	.35	.48
6. Miscellaneous piping . . . . .	.03	.03	.06
7. Distillate troughs . . . . .	.04	.04	.08
8. Subtotal . . . . .	.93	.91	1.84
9. Sales tax and contractor's labor tax.			.09 <sup>a</sup>
10. Contractor's overhead and profit. .			.16 <sup>a</sup>
11. Total. . . . .			2.09

<sup>a</sup> Actual cost. Unmarked figures are estimated.

Table 5. Cost estimates based upon Battelle data and OSW standardized procedure (modified for solar)\*

	250 000 sq ft still		1000 000 sq ft still		833 333 sq ft	
	Present <sup>b</sup> (25 000 gpd)	Projected <sup>a</sup>	Present <sup>b</sup> (100 000 gpd)	Projected <sup>a</sup>	(100 000 gpd) Projected <sup>c</sup>	
<b>Installed costs :</b>	\$ 342 500	\$ 250 000	\$ 1 370 000	\$ 1 000 000	\$ 833 333	
Other plant costs						
Raw water supply . . . . .	125	125	500	500	500	
Product storage . . . . .	250	250	1 000	1 000	1 000	
Contingencies (2% of above) . . . . .	6 850	5 007.50	27 430	20 030	16 697	
Engineering (2% of above) . . . . .	6 987	5 107.64	27 949	20 431	17 006	
Interest on investment during construction (4%) . . . . .	14 256	10 420.00	57 015	41 678	34 681	
<b>TOTAL PLANT INVESTMENT . . . . .</b>	<b>370 968</b>	<b>270 910.14</b>	<b>1 483 894</b>	<b>1 083 639</b>	<b>903 217</b>	
	<i>Life (years)</i>					
	50	50	20	50	20	50
<b>Operating costs (365 days per yr.) :</b>						
Supplies and maintenance materials (0.0014% TPI) . . . . .	\$ 5.19	\$ 3.79	\$ 20.77	\$ 20.77	\$ 15.17	\$ 15.17
Operating labor and maintenance (1 man) . . . . .	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
Amortization (20 or 50 yr. at 4%) . . . . .	48.23	35.22	332.39	192.91	242.74	140.89
Taxes and insurance (0.006% TPI) . . . . .	22.26	16.24	89.03	89.03	65.02	65.02
Interest on working capital (0.00725 × above) . . . . .	0.69	0.55	3.35	2.34	2.49	1.74
<b>TOTAL OPERATING COST/STREAM DAY.</b>	<b>96.37</b>	<b>75.80</b>	<b>465.54</b>	<b>325.05</b>	<b>345.42</b>	<b>242.82</b>
<b>Cost per 1 000-gallon product water . . . . .</b>	<b>3.85</b>	<b>3.03</b>	<b>4.65</b>	<b>3.25</b>	<b>3.45</b>	<b>2.43</b>

- \* Average daily solar intensity figures as 2 000 btu/sq ft/day.
- <sup>a</sup> Based on \$1.00/sq ft installed cost and 0.1 gal/day/sq ft production.
- <sup>b</sup> Based on \$1.37/sq ft installed cost and 0.1 gal/day/sq ft production.
- <sup>c</sup> Based on \$1.00/sq ft installed cost and 0.12 gal/day/sq ft production.

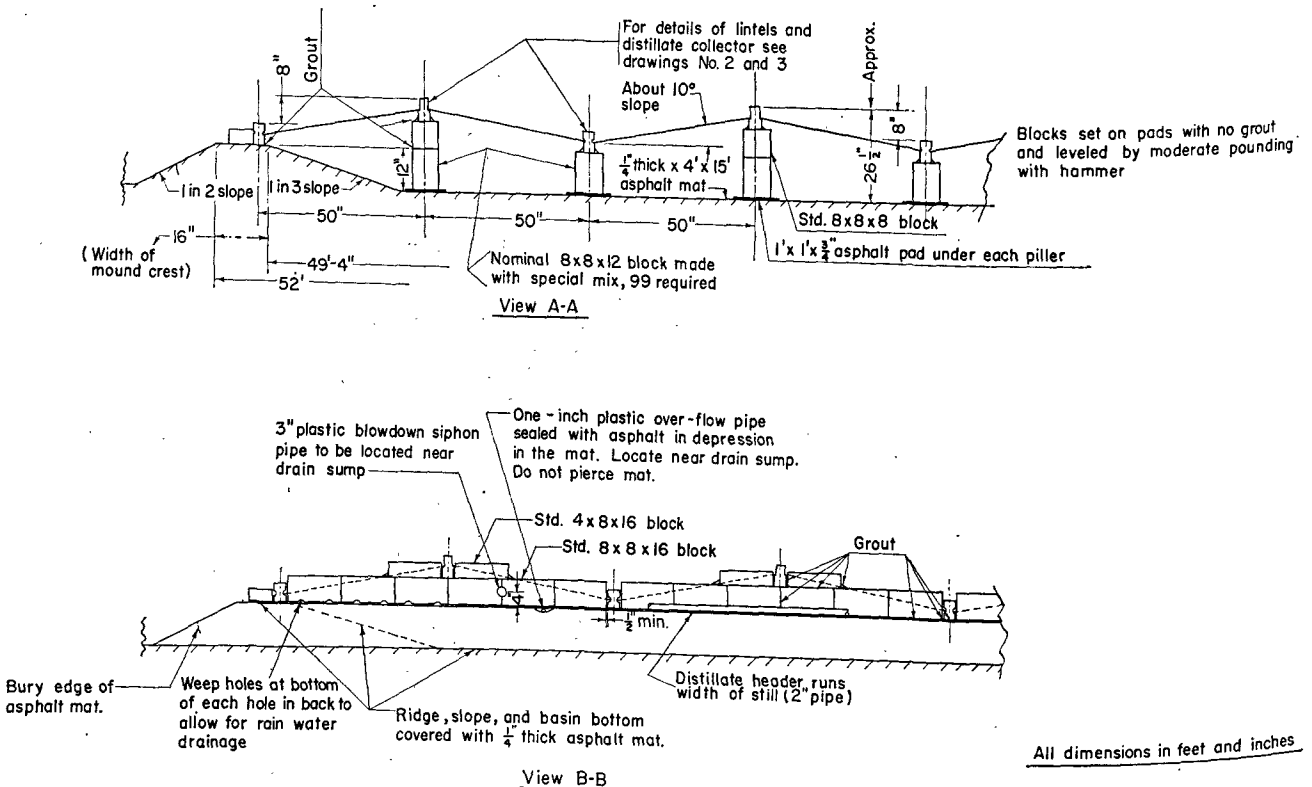


Figure 16. Improved glass-covered basin still. Drawing No. 1 (continued)



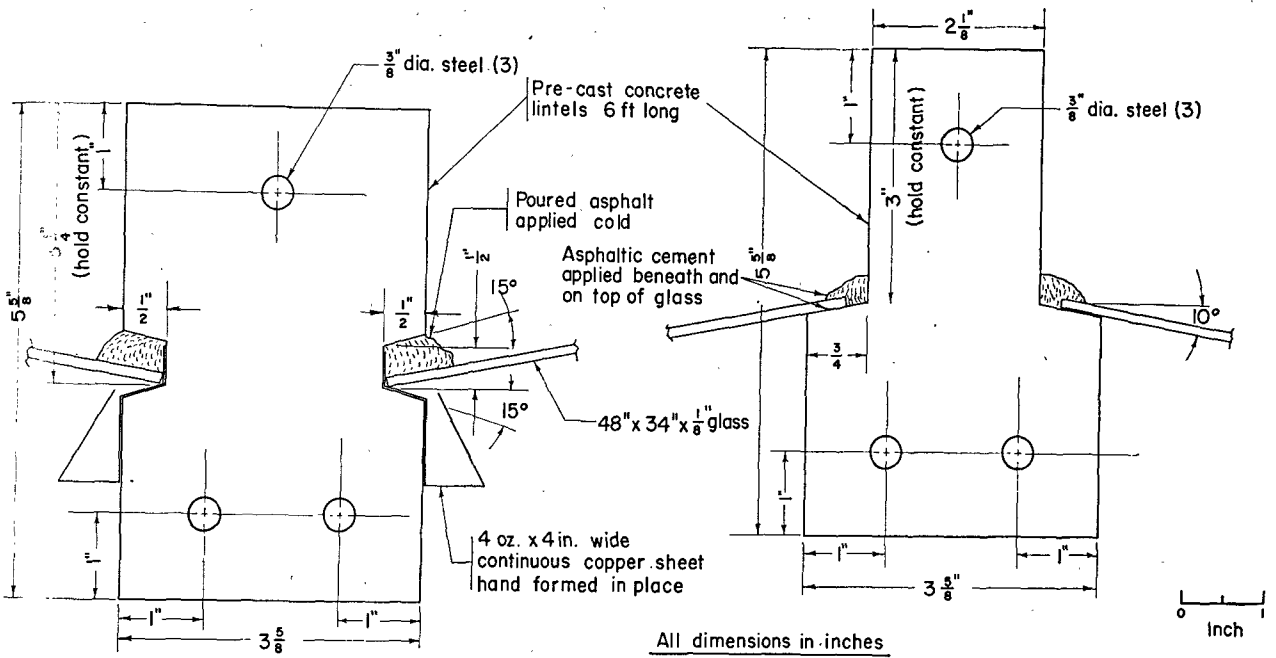


Figure 17. Improved glass-covered basin still. Drawing No. 2

sq ft/day production. Further details are given in table 5.

It is obvious that almost all the cost of water produced by solar distillation is in materials and installation. If only operation and maintenance costs are considered, then the cost of the fresh water is extremely low.

### Plastics films

#### EVALUATION

The advantages of being able to use thin transparent plastics films in solar stills have been mentioned previously; however, for plastics film use to be economically feasible, it is necessary that they have

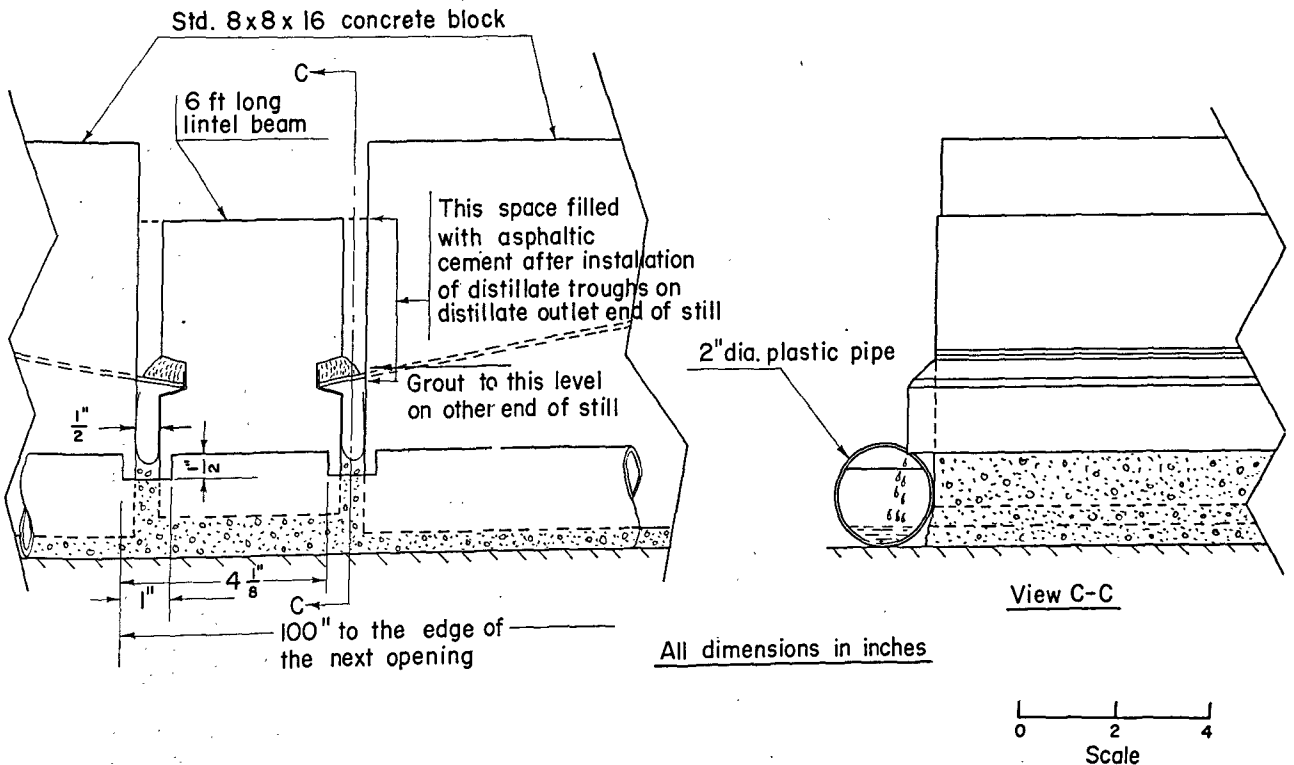


Figure 18. Improved glass-covered basin still. Drawing No. 3

Table 6. Economics of solar stills  
(Battelle Memorial Institute)

Production rate, gal/day	Performance available with today's technology		Best performance to be expected in near future	
	270	100 000	270	100 000
<i>Performance of still</i>				
Gal/(ft <sup>2</sup> ) (day) <sup>a</sup> . . . . .	0.09	0.09	0.11	0.11
Area of still, ft <sup>2</sup> . . . . .	3 000	1 110 000	2 560	910 000
Area of still, acres . . . . .	.069	25.5	.059	20.8
Expected life, years . . . . .	30	30	50	50
<i>Initial cost of still,<sup>b</sup> dollars per square foot</i>				
	\$	\$	\$	\$
Basic materials . . . . .	.97	.77	.70	.60
Labor, site preparation and assembly . . . . .	.80	.48	.50	.30
Contractor's fee <sup>c</sup> . . . . .	.27	.12	.19	.09
Total cost . . . . .	2.04	1.37	1.39	0.99
TOTAL COST IN DOLLARS	6 120	1 520 000	3 560	901 000
<i>Yearly cost of still operation in dollars</i>				
	\$	\$	\$	\$
Labor <sup>e</sup> . . . . .	nil	6 000	nil	6 000
Materials . . . . .	20	5 000	10	3 000
Electric power <sup>c</sup> . . . . .	1.46	540	1.46	540
Capital charges <sup>d</sup> . . . . .	443	77 500	226	35 100
TOTAL YEARLY COSTS	464	89 040	237	44 640
Water cost, dollars/1 000 gal . . . . .	4.70	2.44	2.40	1.22

<sup>a</sup> Average solar radiation = 2 000 btu (ft<sup>2</sup>) (day).

<sup>b</sup> Land acquisition and property taxes not considered. Materials and labor costs are appropriate for eastern seacoast, continental United States.

<sup>c</sup> Distillate, brine, and raw water pumped against 10-foot head. Brine concentration 4:1. Over-all pumping efficiency 10 per cent with electric power at 2 cents per kWh.

<sup>d</sup> Determined on equal yearly payment basis during expected life. This amount would repay initial cost of still and interest charges of 6 per cent on small still and 3 per cent on large still. These interest rates are considered appropriate for private and public ownership, respectively.

<sup>e</sup> Assumed labor cost for one full-time maintenance man with necessary supervision and incidental employment charges.

<sup>f</sup> 16 per cent for small stills and 10 per cent for large stills.

reasonable life in the environment encountered by solar stills. Evaluation of plastics films was part of the Bjorksten Research Laboratories investigations. Many materials were tested from 1956 to 1958 (2).

It was found that results obtained by the usual plastics weathering exposure test, under dry conditions, were not suitable for evaluating films under solar-still conditions. For this reason, an actual exposure test was developed that more nearly simulated solar-still operations. Battelle has continued and expanded these tests since operations were begun at Daytona Beach.

Two samples of each plastics films material are being tested on small zero-output stills, which consist of 5-gallon paint drums containing salt water over which the plastics films are placed. The plastics film is held on the top of the paint drum by black polyethylene tubing wrapped around the drum and film and held tightly by a spring. The drums are set so that the plastics film is at an angle of 30° to the horizontal, facing south.

At the present time some 40 transparent plastics films available from commercial organizations have

been or are being tested. The film that stands up without noticeable change for as long as the tests have been underway is polytetrafluoroethylene; next in rating for use is polyvinylfluoride and polychlorotrifluoroethylene types; next, polyglycol terephthalate,<sup>2</sup> particularly that treated for weatherability.

#### TREATMENT

The Franklin Institute conducted research on producing permanently hydrophilic surfaces on plastics films for solar stills (5). Two principal means of producing transparent hydrophilic surfaces on a variety of plastics films for solar-still condensing surfaces were investigated; one was vacuum deposition of silicon monoxide on the surfaces; the other, the chemical deposition of titanium dioxide on the surface via the hydrolysis of tetraalkyl orthotitanates. Both proved to be technically feasible; however, the titanium dioxide process is the present choice

<sup>2</sup> Some of these materials are also known under the following names: polytetrafluoroethylene, Teflon; polyvinylfluoride, Teslar; polychlorotrifluoroethylene, Kel-F; and polyglycol terephthalate, Mylar.

for large-scale film treatment because of lower cost and adaptability to a large-scale operation. A lab. study of immersion durability of  $\text{TiO}_2$  coated polymers showed no apparent coating failure after 7 months of immersion in distilled water.

Titanium dioxide-coated Teslar was used as the cover material on part of the installation at Daytona Beach, and production improved. Both Mylar and Teslar samples also have been tested in the zero-output small drum stills previously described. Mylar has retained its wettability since October 1959; however, the Teslar began losing its wettability after several months of exposure.

The Franklin Institute is also carrying out research to produce selective infra-red-reflecting surfaces on plastics films for solar stills.

### General conclusions

On the basis of R & D results it is concluded that basin-type stills built directly on dry ground are the only presently practical type for large-capacity solar stills. Two general approaches are possible; one makes use of thin plastics materials, the other of more durable materials — glass, concrete, and asphalt. On the latter approach, OSW has records of proved performance, which includes long-term field evaluations and determinations of energy balances and production data, with actual costs of prototypes of sufficient size to give a reliable basis for projected costs of a larger size. Thus, although further development and improvement are likely, there is available at the present time a glass-covered-basin, solar-still design, as described and shown in drawings (figures 15-18), which can be recommended for a large solar-still installation and which would have predictable performance and economic feasibility in areas advantageous to use of solar stills.

### APPENDIX

#### INSTRUMENTATION AND METHODS OF RECORDING DATA (I)

Evaluating the performance of the solar stills constitutes a major share of the work at the Florida station. Two general types of data are being obtained: daily productivity data and data collected continuously for 72 hours for determining energy balance of stills.

#### Solar radiation

Both total and diffuse solar radiation are measured with 10-junction Eppley pyrhemometers mounted on permanent stands near the center of the test area. The output of each pyrhemometer is recorded on a single-point recorder. The record from each day is integrated with a hand planimeter to determine the total radiation for the day. During the 72-hour energy-balance runs, the area under the total-solar-radiation curve is integrated for each hour during the day to determine the hourly solar radiation intensity.

#### Total radiation

The total radiation, which is the sum of the atmospheric and solar radiation, is measured with a Beckman & Whitley total hemispherical radiometer mounted on a permanent stand

in the still area. The net radiation exchange between the stills and the atmosphere is measured with a Beckman & Whitley net-exchange radiometer. The radiometer is mounted above the still being investigated in a plane that has been experimentally determined to have a constant flux density across the still.

#### Reflected and transmitted solar radiation

The amount of solar radiation reflected from the water surface and bottom of a still is measured with an Eppley pyrhemometer inverted over the water surface. The solar radiation transmitted by the cover of the still is measured with the instrument facing upward directly beneath the cover. The solar radiation reflected upward by the covers is measured with pyrhemometers inverted above the still. The readings of transmitted and reflected radiation are recorded alternately on a single-point recorder for 15 minutes of each hour; for this purpose the instruments were wired through a cam switch. The area under each 15-minute segment is integrated with a hand planimeter, and the readings between segments are interpolated.

#### Solar radiation absorbed by still cover

Solar radiation absorbed by the still cover was determined partly by experimental measurements and partly by theoretical calculation. Absorption of a glass plate can be represented by the equation

$$a = 1 - e^{-kL},$$

where  $a$  = absorptivity,

$k$  = extinction coefficient of glass,  $\text{in.}^{-1}$ ,

$L$  = length of path of light in glass, in.

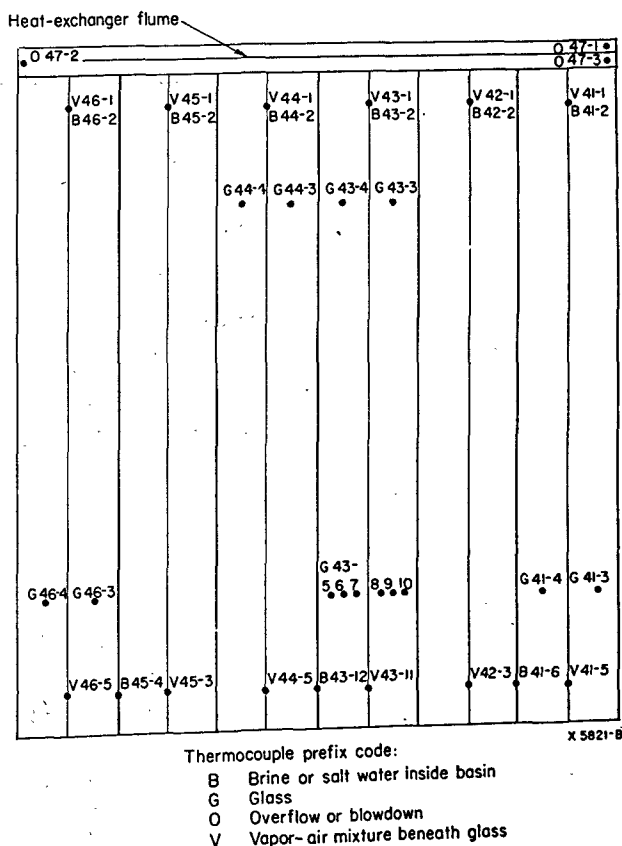


Figure 19. Thermocouple locations for measuring temperatures of brine, vapor, and glass cover in deep-basin still

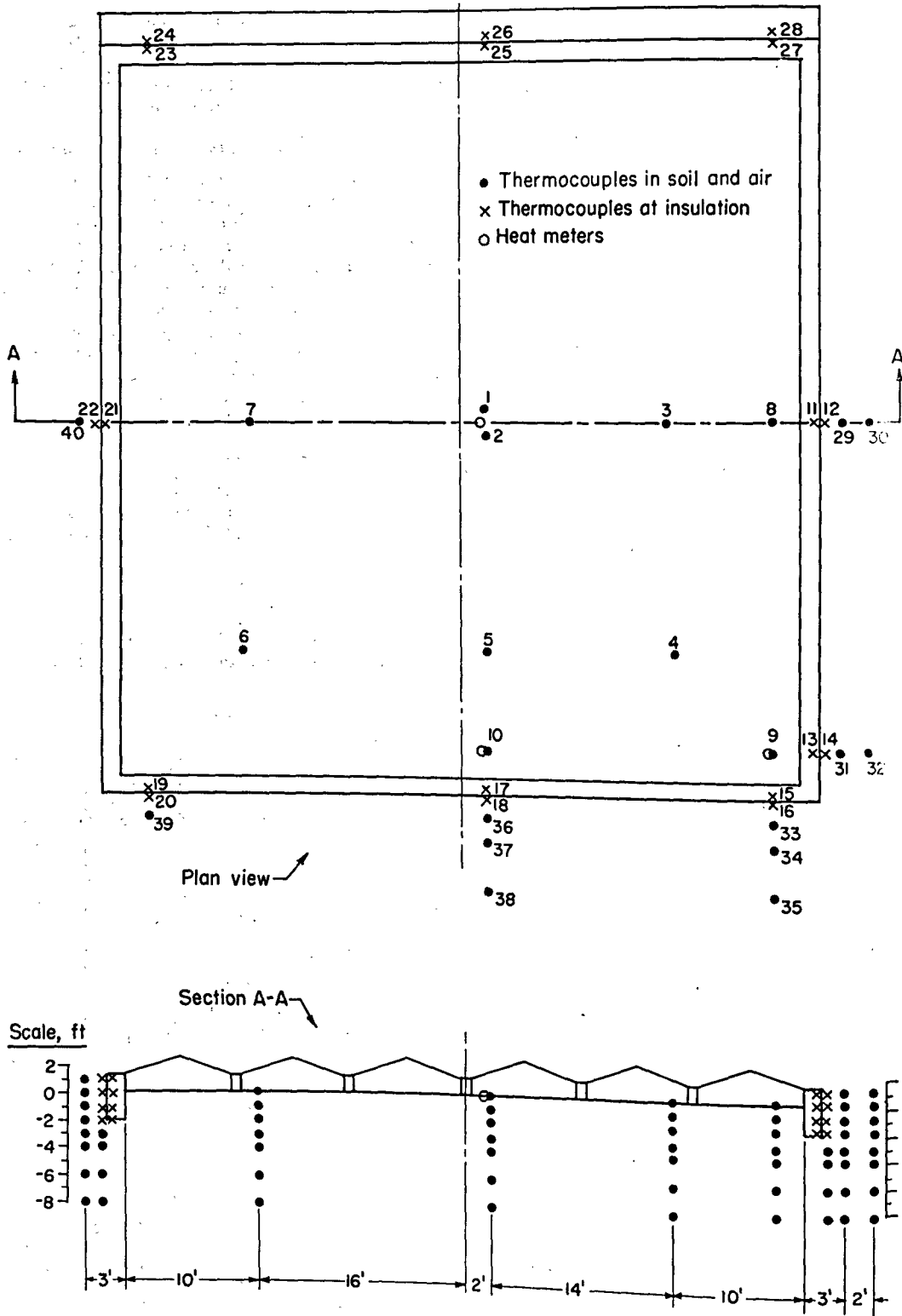


Figure 20. Location of ground instrumentation for deep-basin still

Extinction coefficient,  $k$ , for the glass was determined experimentally to be  $0.222 \text{ in.}^{-1}$ . Using this value of  $k$ , it is possible to calculate solar radiation absorbed by cover from value of  $L$  for various angles of incidence during the day and from corresponding solar-radiation intensity. Values of absorbed solar radiation can then be plotted and resulting curve integrated to determine total absorbed solar radiation.

*Temperatures and ground-heat flow*

Figures 19, 20, and 21 show the locations of the thermocouples and the heat-flow meters in the deep-basin and large plastics stills. The thermocouples are used to measure the temperatures of various components of the stills and of the brine and vapor. Thermocouples are also buried at several depths beneath the

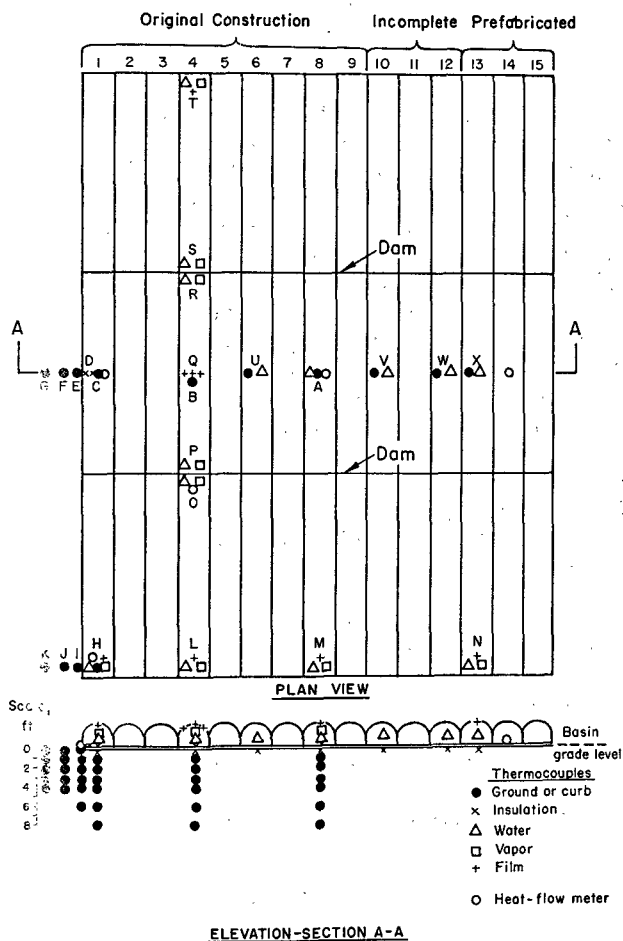


Figure 21. Location of instrumentation for large plastics still

stills to determine isotherms and heat-flow paths beneath the stills. Each thermocouple is connected through a separate switch in the instrument house to an indicating potentiometer calibrated

in degrees Fahrenheit. Thus, a given thermocouple can be read at any time of its particular switch is closed. Also, several of the more important temperatures are recorded continuously on two 12-point recorders.

#### Water-flow rates

The feedwater supply is measured with a Neptune water meter. The distillate produced is measured by means of special dump-type meters. Each meter consists of a tank provided with upper and lower float switches connected to solenoid valves so that the tank automatically fills and empties. Each dump is recorded, and the meters are calibrated in gallons per dump.

#### OTHER INSTRUMENTATION

A wind-speed and direction instrument was loaned by the U.S. Weather Bureau; also a small instrument shelter houses a hygro-thermograph and a thermocouple to record air temperature and humidity. Speed and direction of the wind and the temperature and humidity of the air were averaged for each day; the maximum and minimum values of each and the time at which they occurred were also noted each day.

The salinity of the feedwater was spot-checked at the storage tank and at the source in the Halifax River during tide changes. Salinity was measured by means of a Sol-U-Bridge conductance probe.

#### SPECIFIC PRODUCTIVITY AND EFFICIENCY

The specific productivity of a solar still is expressed in units of gal/sq ft/day and is determined by dividing the total daily gallons of distillate produced by the basin area. For comparison with previous solar distillation work, the efficiency of the solar stills is based upon the amount of solar radiation intercepted by the still. The efficiencies were calculated considering all solar radiation intercepted by the still. The efficiencies were calculated considering all solar radiation incident on the stills as available for distillation. It was assumed that the heat required in sensible heating and evaporation of each pound of distillate is 1070 btu. Therefore, the efficiency of the still is given by the expression

$$N_s = \frac{[\text{Specific production, gal/sq ft (day)}] [8913 \text{ btu/gal}] (100)}{[\text{Solar radiation, btu/(sq ft) (day)}]}$$

where  $N_s$  is the efficiency based only on solar radiation.

## References

- Battelle Memorial Institute, First Two Years' Progress on Study and Field Evaluation of Solar Sea-Water Stills, Office of Technical Services, Washington 25, D.C., in press.
- Bjorksten Research Laboratories, Inc., Weathering Tests of Plastics and Design of Suspended Envelope Solar Stills, Rept. PB161095 (\$1.50), Office of Technical Services, Washington 25, D.C., 1959.
- Bjorksten Research Laboratories, Inc., Development of Plastics Solar Stills, Rept. PB161398 (\$1), Office of Technical Services, Washington 25, D.C., 1959.
- Bloemer, J. W., Collins, R. A., and Eibling, J. A., Field Evaluation of Solar Sea Water Stills, *Advancement in Chemistry Series No. 27*, American Chemical Society, Washington, D.C., 166-77, 1960.
- Franklin Institute, Producing Permanently Hydrophilic Surfaces on Plastic Films for Solar Stills, Rept. PB161064 (75 cents), Office of Technical Services, Washington 25, D.C., 1959.
- Grune, W. N., Collins, R. A., and Thompson, T. L., Forced Convection Multiple-Effect Solar Still for Desalting Sea and Brackish Waters, *Proceedings of the U.N. Conference on New Sources of Energy, 1961*, included above, Paper S/14.
- Löf, G. O. G., Demineralization of Saline Water With Solar Energy, Rept. PB161379 (\$2.25), Office of Technical Services, Washington 25, D.C., 1954.
- Löf, G. O. G., Design and Operating Principles in Solar Distillation Basins, *Advancement in Chemistry Series No. 27*, American Chemical Society, Washington, D.C., 156-65, 1960.
- Löf, G. O. G., Eibling, J. A., and Bloemer, J. W., Energy Balances in Solar Distillers, presented at 53d Annual Meeting, AIChE, Washington, D.C., 1960.
- OSW (Office of Saline Water), A Standardized Procedure for Estimating Costs of Saline Water Conversion, OSW, U. S. Department of the Interior, Washington 25, D.C., 1956.
- OSW Saline Water Conversion Report for 1960, OSW, U. S. Department of the Interior, Washington 25, D.C., 1961.
- Strobel, Joseph J., Saline Water Conversion Today, *Chemical Engineering Progress*, 37-40, January, 1961.
- Telkes, Maria, New and Improved Methods for Lower Cost Solar Distillation, PB161402 (\$1), Office of Technical Services, Washington 25, D.C., 1959.
- Telkes, Maria, Solar Still Construction, Rept. PB161404 (75 cents), Office of Technical Services, Washington 25, D.C., 1959.

### Summary

The possibilities of utilizing solar energy for conversion of saline waters were realized early in the Saline Water Conversion Program. Since 1953, the Office of Saline Water has had projects in this field, carried out primarily by means of contracts with R & D organizations.

On the basis of initial investigations of means of utilizing solar energy for saline water conversion, OSW has sponsored further research, with emphasis on developing nonfocussing types of solar stills, of simple design, in efforts to lower costs by increasing efficiency and by reducing costs of the equipment and operation.

Distillation by means of solar heat has the advantage of eliminating the cost of fuel energy otherwise required. The diffuse nature of solar energy, however, makes necessary the use of large areas for collection. Research has indicated that for solar stills to be economically practicable they must have (a) simple design, (b) low initial cost, (c) long life, (d) little maintenance expense, and (e) require minimum operating labor.

The primary objective of this paper is to deal with solar stills of large capacity, which must compete with other distillation processes, and to present information and data that has led to a practical, economically feasible design for a solar distillation plant up to 100 000-gpd capacity.

The Department of the Interior established a solar distillation research station at Daytona Beach, Florida, in 1958, to provide a field installation for integrated solar-still development programs where small pilot plants or equipment prototypes of various designs could be installed, operated, and further developed. The station has been established and operated through a research and development contract with Battelle Memorial Institute.

Since that time, a 2 500-sq-ft, glass-covered, deep-basin still and two air-supported plastics stills of 500 and 2 300 sq ft have been constructed and operated for periods of more than 1 year. The deep-basin still was based upon L6f's design, and the plastics still upon Du Pont design, with their cooperation in furnishing materials and construction assistance.

Additional research on other designs such as tilted stills, suspended envelope-type stills, and stills with external condensers has been carried out under other contracts. New pilot units, based upon some of the research results, are being installed at the research station for evaluation and further development. Evaluation of various plastics materials is also under way.

Extensive instrumentation at the Daytona Beach site, particularly on the glass-covered, deep-basin still made possible energy-balance runs that produced much valuable information. Results of the tests

that show productivity of the basin-type stills was almost entirely dependent on intensity of solar radiation and was not affected appreciably by other weather conditions. There was little difference in performance of the glass-covered, deep-basin and air-supported, plaster-covered-basin stills when both were in good operating condition (free of vapor or distillate leaks). Thermal efficiencies were in the 35 per cent range with an average solar radiation of 2 000 btu/sq ft/day and average productivity of 0.09 gal/sq ft/day. Productivity increased threefold when solar radiation increased twofold from 1 000 to 2 000 btu/sq ft/day. An example of the distribution of solar energy on the glass-covered, deep-basin still during a 3-day period in October 1959, when average solar radiation was 1 400 btu/sq ft/day, follows:

	Per cent of solar radiation
(a) Evaporation of distillate (efficiency) . . . . .	32
(b) Ground and edge heat losses . . . . .	2
(c) Solar radiation reflected from still . . . . .	11
(d) Solar radiation absorbed by cover . . . . .	4.5
(e) Radiation from basin water to cover . . . . .	26
(f) Internal convection . . . . .	8
(g) Re-evaporation of distillate and unaccounted-for losses . . . . .	16.5
	100.0

Studies of the glass-covered, deep-basin still showed that cost of construction could be reduced substantially through design improvements, and useful life of the still could be increased, possibly to 50 years. An improved basin still along these lines was completed in April of this year (1961). The basin liner consists of prefabricated asphaltic mat without submerged perforation. All support columns for the glass rest directly on the liner. Special concrete beams support the glass and simplify sealing. The major phases of construction included (a) grading, (b) installation of asphaltic mat, (c) erection of concrete blocks and beams, and (d) installation of glass and distillate troughs. Operation of this still is expected to begin in May 1961.

Costs for construction of the still were \$1.84 per sq ft—materials at 91 cents and labor 93 cents. (This compares with actual cost of \$7 per square foot for the original deep-basin still built at the Daytona Beach site.) A large part of the labor cost was in grading and compacting the soil base—essentially a hand-labor operation for this small size.

Several cost estimates have been made, based upon the data obtained from the glass-covered, deep-basin still. Battelle Memorial Institute made estimates on a 100 000-gpd still, based upon a municipally owned plant. Assuming a \$1.37-sq-ft cost installed and production at 0.09 gal/sq ft/day at solar radiation of 2 000 btu/sq ft/day, their estimate is \$2.44 per

thousand gallons. On an optimized basis of \$0.99-sq-ft cost and \$0.11 production, their estimate is \$1.22 per thousand gallons.

Further estimates have been made, based upon the OSW standardized procedure modified for solar application. For a 100 000-gpd still, present cost per thousand gallons per day of product water is \$3.25, based upon \$1.37-sq-ft cost installed and \$0.10 gal/sq ft/day production. A projected estimate, based upon further optimization, is \$2.06 per thousand gallons, using \$1.00-sq-ft cost installed and \$0.12 gal/sq ft/day production. It is obvious that almost all the cost of water produced by solar distillation is in materials and installation. If only operation and maintenance costs are considered, then the cost of the fresh water is extremely low.

The experimental work at Daytona Beach on the use of plastics confirms the promise of the technical and economical feasibility of these types of solar stills. Beginning in 1959, further developments of plastics-covered basin stills were undertaken by

E. I. Du Pont de Nemours & Company at a site near Miami, Florida.

On the basis of R&D results, it is concluded that basin-type stills built directly on dry ground are the only presently practical type for large-capacity solar stills. Two general approaches are possible; one makes use of thin plastics materials, the other of more durable materials—glass, concrete, and asphalt. On the latter approach, OSW has records of proved performance, which includes long-term field evaluations and determinations of energy balances and production data, with actual costs of prototypes of sufficient size to give a reliable basis for projected costs of a larger size. Thus, although further development and improvement are likely, there is available at the present time a glass-covered-basin, solar-still design that can be recommended for a large solar-still installation and which would have predictable performance and economic feasibility in areas advantageous to use of solar stills. (See figures 14, 15 and 16, attached.)

## PROGRÈS RÉALISÉS DANS LA DISTILLATION SOLAIRE (DÉPARTEMENT DE L'INTÉRIEUR DES ÉTATS-UNIS)

### Résumé

La possibilité d'utiliser l'énergie solaire à la conversion des eaux saumâtres en eau douce a été entrevue dès le début de l'exécution du Programme de conversion des eaux saumâtres. Depuis 1953, le Bureau compétent a entrepris des projets dans ce domaine, lesquels sont en voie d'exécution, principalement sous forme de contrats avec des entreprises qui se chargent d'études et de mises au point.

Sur la base des premiers travaux de recherches portant sur les moyens d'utilisation de l'énergie solaire à la conversion des eaux saumâtres, le Bureau a patronné d'autres programmes de recherches, en s'attachant particulièrement à la mise au point des alambics solaires du type sans concentration au foyer et d'une réalisation simple, dans le but de réduire les prix en augmentant le rendement et en réduisant les prix du matériel et les frais d'exploitation.

La distillation par la chaleur solaire a l'avantage d'éliminer les frais de combustibles qui interviendraient dans le cas contraire. La nature diffuse de l'énergie solaire impose toutefois l'emploi de grandes surfaces de récupération. Les recherches indiquent que, pour que les alambics solaires soient économiquement réalisables, ils doivent : a) être d'une conception simple; b) exiger des investissements initiaux réduits; c) avoir une longue durée de service utile; d) demander peu de frais d'entretien; e) se contenter d'un minimum de main-d'œuvre.

Le présent mémoire se consacrera, au premier chef, aux alambics solaires à grande capacité qui doivent faire concurrence aux autres procédés de distillation,

et présentera des renseignements et des données aboutissant à la réalisation d'un système pratique et économiquement valable de distillation, avec une capacité allant jusqu'à 100 000 gallons par jour.

En 1958, le Département de l'intérieur a établi un poste de recherches dans le domaine de la distillation solaire à Daytona Beach, en Floride, pour disposer d'une installation servant à réaliser des programmes de mise au point d'alambics solaires intégrés dans le cadre desquels de petites installations pilotes ou des prototypes d'équipement de divers modèles pourraient être exploités et perfectionnés. L'installation a été créée et elle est exploitée dans le cadre d'un contrat de recherches et de mises au point avec l'Institut Battelle.

Depuis cette époque, un alambic à bassin profond de 2 500 pieds carrés (232 m<sup>2</sup>) recouvert de verre et deux alambics en composition plastique soutenue par l'air, de 500 et 2 300 pieds carrés (46 m<sup>2</sup> et 213 m<sup>2</sup>), ont été construits et fonctionnent depuis des périodes de plus d'un an. Le système à bassin profond reposait sur la conception de Löff et le modèle en composition plastique sur un projet de Du Pont, avec la collaboration de cette compagnie pour la fourniture de matériaux et d'aide à la construction.

Certaines recherches complémentaires sur d'autres conceptions, telles que les alambics inclinés, les alambics du type à enveloppe suspendue et ceux ayant des condenseurs extérieurs, ont été menées dans le cadre de certains autres contrats. De nouveaux groupes-pilotes, basés sur certains des résultats de ces

recherches, sont en cours d'installation au poste de recherches, aux fins d'évaluation et de perfectionnement ultérieur. On procède également à une évaluation des diverses substances plastiques.

Les très nombreux instruments disponibles au site de Daytona Beach, particulièrement pour l'alambic à bassin profond recouvert de verre, ont permis des calculs de bilans énergétiques qui ont fourni nombre de renseignements précieux. Les résultats des essais ont démontré que la productivité des alambics du type à bassin dépend presque entièrement de l'intensité du rayonnement solaire et ne souffre pas de façon appréciable du chef des autres conditions météorologiques. On a noté peu de différences dans le rendement des alambics recouverts de verre à bassin profond et ceux qui sont du type soutenu par l'air et recouverts de plâtre quand ils fonctionnent dans de bonnes conditions (sans vapeur et sans fuites des produits de la distillation). Les rendements thermiques étaient d'environ 35 p. 100 pour un rayonnement solaire moyen de 2 000 Btu par pied carré par jour et une productivité moyenne de 0,09 gallon par pied carré par jour. La productivité a triplé quand le rayonnement solaire a doublé, passant de 1 000 à 2 000 Btu par pied carré par jour. Un exemple de la répartition de l'énergie solaire dans un alambic à bassin profond couvert de verre pendant une période de trois jours, en octobre 1959, avec un rayonnement solaire moyen de 1 400 Btu/pied carré/jour, est donné ci-dessous :

	<i>Pourcentage du rayonnement solaire</i>
a) Évaporation des produits distillés (rendement) . . .	32
b) Pertes de chaleur sur les bords et par le sol . . .	2
c) Rayonnement solaire réfléchi par l'alambic . . .	11
d) Rayonnement solaire absorbé par le couvercle . . .	4,5
e) Rayonnement entre l'eau du bassin et le couvercle . . .	26
f) Convection interne . . . . .	8
g) Ré-évaporation du produit distillé et pertes invisibles . . . . .	16,5
	100,0

Les études sur l'alambic à bassin profond couvert de verre ont indiqué que les frais de construction pourraient être réduits d'une manière appréciable par des améliorations de la conception de l'installation et que l'on pourrait augmenter la vie utile de l'alambic, pour la porter peut-être à cinquante ans. On a construit ainsi un alambic à bassin d'un modèle amélioré en avril 1961. Le revêtement intérieur du bassin est constitué par un tapis asphaltique préfabriqué, sans perforations submergées. Toutes les colonnes de soutien du verre reposent directement sur le revêtement. Des poutres spéciales en ciment armé soutiennent le verre et simplifient le système d'étanchéité. Les principales phases de la construction ont compris : a) la préparation de la surface du terrain ; b) l'installation du support en asphalte ; c) le montage des blocs en ciment armé et des poutres ; d) l'installation du verre et des auges de distillation. Le fonctionnement de cet alambic doit commencer en mai 1961.

Les frais de construction ont été de 1,84 dollar par pied carré, les matériaux étant chiffrés à 0,91 dollar et la main-d'œuvre à 0,93 dollar. (Ceci est à comparer avec un prix effectif de 7 dollars par pied carré pour l'alambic original à bassin profond construit à Daytona Beach.) Une grosse part des frais de main-d'œuvre est applicable à la mise à niveau et au tassement de la base en terre, travail qui se fait essentiellement à la main pour une telle opération de petite envergure.

On a procédé à plusieurs évaluations des frais qui reposent sur les données fournies par un alambic à bassin profond couvert de verre. L'Institut Battelle a fait des évaluations sur un alambic capable de donner 100 000 gallons par jour, en envisageant le cas d'une installation municipale. Si on admet des frais de 1,37 dollar par pied carré installé et une production de 0,09 gallon par pied carré par jour avec un rayonnement solaire de 2 000 Btu par pied carré par jour, l'évaluation ressort à 2,44 dollars par 1 000 gallons. En ramenant les valeurs à 0,99 dollar par pied carré pour les frais de premier établissement et 0,11 dollar pour la production, l'évaluation ainsi faite tombe à 1,22 dollar par 1 000 gallons.

On a procédé à d'autres évaluations basées sur la procédure standardisée du Bureau, modifiées pour les applications solaires. Pour un alambic donnant 100 000 gallons par jour, les prix actuels par 1 000 gallons d'eau produite par jour sont de 3,25 dollars, sur la base d'un coût de 1,37 dollar par pied carré installé et 0,10 dollar par gallon/pied carré/jour pour la production. Une évaluation projetée, reposant sur des perfectionnements ultérieurs, ressort à 2,06 dollars par 1 000 gallons, en prenant des frais de 1,00 dollar/pied carré installé et une production quotidienne de 0,12 gallon/pied carré. Il est évident que la presque totalité des frais de production de l'eau par la distillation solaire porte sur les matériaux et l'installation. Si on ne considère que les frais d'exploitation et d'entretien, le prix de l'eau douce est donc très modique.

Les travaux expérimentaux de Daytona Beach sur l'utilisation des matières plastiques confirment la promesse d'une réalisation technique économique de ces types d'alambics solaires. A dater de 1959, la société E. I. Du Pont de Nemours a entrepris de nouveaux perfectionnements sur les alambics à bassin couvert de composition plastique, près de Miami, en Floride.

Sur la base des résultats déjà obtenus, on peut conclure que les alambics du type à bassin construits directement sur un sol sec sont les seuls actuellement pratiques pour les dispositifs solaires à grande capacité. On peut envisager deux manières générales d'attaquer la question : dans l'une il est fait usage de composition plastique mince, et dans l'autre de matériaux plus durables tels que le verre, le ciment armé et l'asphalte. Si on envisage la deuxième manière d'attaquer le problème, on trouvera, au Bureau, des données qui démontrent la qualité des résultats, comportant des évaluations à long terme sur place et des déterminations de données sur les



bilans énergétiques et la production, avec les prix réels des prototypes de dimensions suffisantes pour fournir une base sûre à l'usage des évaluations portant sur de plus grandes installations. De la sorte, bien qu'il soit probable que de nouvelles améliorations soient réalisées, on dispose actuellement d'un alambic

solaire constitué par un bassin couvert de verre que l'on peut recommander pour les grosses installations, dont la production pourrait être prédite et les possibilités d'application économique seraient avantageuses dans certaines régions propres à leur emploi (voir figures 14, 15 et 16).

*Agenda item III.F*

**USE OF SOLAR ENERGY FOR HIGH TEMPERATURE PROCESSING  
(SOLAR FURNACES)**

*Point III.F de l'ordre du jour*

**APPLICATION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE AUX OPÉRATIONS A HAUTE  
TEMPÉRATURE (FOURS SOLAIRES)**

*Chairman — Président*

Valentin A. BAUM

*Rapporteur*

Félix TROMBE

APPLICATION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE AUX OPÉRATIONS  
A HAUTE TEMPÉRATURE (FOURS SOLAIRES)

Félix Trombe\*

Les usages de l'énergie solaire décrits dans cette section comportent l'intervention d'appareils d'optique permettant de grandes concentrations de l'énergie apportée par le rayonnement solaire direct. L'absorption totale de cette énergie, concentrée sur une faible surface ou dans un faible volume relatifs, conduit à produire localement des températures très élevées. C'est l'effet qui est obtenu dans les « fours solaires » appelés ainsi improprement par extension de la zone réceptrice, elle-même constituant éventuellement un four, à l'ensemble de l'appareillage optique et mécanique utilisé. Il faut souligner aussi que, pour certains usages du rayonnement solaire concentré optiquement, ce n'est pas l'élévation de température, souvent très nuisible, qui est recherchée, mais l'effet photochimique dû à une absorption de photons pour certains domaines de longueurs d'onde seulement. Le rapporteur estime donc qu'il y a lieu d'étendre le domaine du point III.F de l'ordre du jour à toutes les utilisations du rayonnement solaire à *haute concentration*, qu'il s'agisse de l'emploi du rayonnement total ou seulement de l'énergie apportée dans certains domaines de longueurs d'onde. Il faut également rappeler que de nombreuses techniques de captage du rayonnement solaire convergent décrites ici sont valables pour l'exploitation des effets thermiques donnés par la convergence de rayonnements artificiels divers; ces montages, appelés aux États Unis « fours à image », prennent beaucoup d'importance dans les laboratoires de recherches. Il peut être également suggéré de réaliser, pour certaines sources artificielles riches en longueurs d'onde utilisables en photochimie, des montages convergents du même type que ceux qui servent à la concentration des rayons solaires et à leur exploitation photochimique.

L'énergie solaire disponible dans le rayonnement solaire direct semble, à première vue, dérisoire pour son exploitation en vue d'obtenir des hautes températures. On dispose au-delà de la stratosphère de 1 350 watts environ par mètre carré et de 1 000 watts/m<sup>2</sup>, dans les meilleures conditions, au niveau de la surface terrestre. Une telle densité d'énergie correspond à peu près au rayonnement du corps noir porté seulement à 100 °C. L'examen de la répartition spectrale énergétique du rayonnement solaire, reportée en particulier dans la figure 1 du rapport S/66, conduit à des perspectives meilleures. L'énergie

solaire correspond au rayonnement d'un corps noir porté à environ 6 000 °K. Au niveau de la terre, elle est dispersée, mais non dégradée. La faible élévation de température qu'elle produit est due à l'angle solide très faible,  $7 \cdot 10^{-5}$  stéradian, sous lequel le soleil « éclaire » la terre. Il suffira donc d'augmenter beaucoup cet angle solide d'éclairement pour obtenir une localisation d'énergie superficielle pouvant conduire à des températures élevées. Pratiquement, cette localisation est réalisée au « foyer » d'un système optique très ouvert. L'ouverture maximum du paraboloïde pour l'éclairement d'un plan est donnée par le rapport  $\frac{D}{f} = 4$ ,  $D$  étant le diamètre du miroir et  $f$  la distance focale. Pour l'éclairement d'un cylindre ou d'une sphère, la valeur de  $\frac{D}{f}$  peut encore être notablement augmentée.

Les grandes concentrations de rayonnement nécessaires pour les opérations de haute température ou les localisations d'énergie à usage photochimique conduisent à utiliser les systèmes optiques dans des conditions assez rigoureuses. L'axe du système doit être parallèle au rayonnement incident. Cette condition est également impérative pour recevoir, aux différentes heures de la journée, le maximum d'énergie incidente. La position apparente du soleil étant variable pendant la durée d'un jour et différente chaque jour, il est indispensable d'orienter constamment le système récepteur pour réaliser les conditions précédentes. Deux méthodes ont été utilisées :

a) Le dispositif optique « concentrateur » (miroir parabolique ou lentille) est braqué directement sur le soleil;

b) Le dispositif optique « concentrateur » est fixe; il reçoit le rayonnement solaire suivant son axe, par l'intermédiaire d'un miroir plan « orienteur » mobile.

Le principal défaut que présente le rayonnement solaire, pour une utilisation pratique, est son intermittence, soit régulière (intervalle des jours et des nuits), soit fortuite (interposition de nuages ou de brumes formant écran entre la surface terrestre et le soleil). Dans beaucoup de régions entre les tropiques et les zones tempérées, la « panne » de soleil est rare, mais l'intermittence journalière conduit à prévoir soit des opérations réalisables dans un cycle journalier d'ensoleillement, soit des opérations sans intervention de masse thermique pouvant être mises en route et interrompues rapidement.

\* Directeur de recherches, Centre national de la recherche scientifique, Paris.

### Les machines solaires

#### *Les récepteurs directs, les dispositifs à orienteurs et leurs guidages*

La réception directe présente l'avantage de ne comporter qu'une seule réflexion sur le miroir concentrant le rayonnement. On trouvera, dans la communication S/16, figure 1, différents types de récepteurs directs. Le principal inconvénient de ce dispositif est le déplacement dans l'espace de l'axe de convergence du rayonnement et, par conséquent, le déplacement du foyer situé sur cet axe. Cette disposition est également défavorable, le rayonnement convergent attaquant les substances de bas en haut ou latéralement, et il est malaisé de réaliser certaines opérations, par exemple des fusions, par l'emploi de tels appareils. Par contre, lorsqu'il s'agit d'opérations sur des surfaces solides, réactions entre gaz, cracking, etc., la réception directe est la plus simple. Dans certains montages (appareils de Meudon, 1946), l'image du soleil est renvoyée vers le bas au moyen d'un miroir plan interposé sur le trajet des rayons convergents. Il faut signaler également que la réception directe peut être envisagée plus favorablement pour des appareils moins ouverts que les paraboloides et comportant l'emploi de lentilles. Le seul four solaire à lentilles qui ait été construit et qui fonctionne, au California Institute of Technology, se déplace autour d'un foyer dont la position dans l'espace est fixe.

La réception du rayonnement solaire par un miroir plan orienteur, puis par un miroir parabolique fixe, a été mise en pratique par Cohn, puis par le laboratoire de Mont-Louis. Cette méthode paraît maintenant se généraliser, aussi bien pour la plupart des appareils de laboratoire que pour les grandes installations. L'avantage considérable de ce dispositif est de comporter un foyer fixe dont l'orientation, horizontale, verticale ou inclinée, peut être choisie en fonction de l'opération à effectuer.

Le guidage des récepteurs directs pour maintenir l'axe optique des appareils dans la direction du soleil peut être fait, soit par une méthode astronomique, soit par un contrôle de cellules ou de transistors. Quelques appareils, en particulier le grand four solaire d'Alger, sont placés sur un axe équatorial dont le mouvement est asservi à celui d'une horloge astronomique. Ce procédé présente l'avantage de maintenir dans la direction du soleil l'axe du paraboloïde, même si le rayonnement solaire est intercepté momentanément par un nuage. La déclinaison du miroir est changée, naturellement, à la main, chaque jour. Il semble que cette méthode d'asservissement, pour les grandes machines comme celles d'Alger, soit assez coûteuse. Néanmoins, elle paraît être retenue pour les petits appareils, par Peter E. Glaser (S/16). Fréquemment, le guidage automatique des miroirs récepteurs est obtenu par l'emploi d'une lentille auxiliaire dont l'axe optique est parallèle à celui du paraboloïde. Un écran circulaire E, situé dans le plan focal et ayant sensiblement les dimensions de l'image du soleil donnée par la lentille, est entouré de quatre cellules ou transistors de contrôle inter-

venant deux à deux pour commander les deux directions de site et les deux directions d'azimut. Un léger débordement de l'image du soleil au-delà de l'écran E provoque l'éclairement d'une ou deux des cellules de guidage. Ce dispositif est universellement adopté, soit pour guider les appareils directs, soit, comme nous le verrons, pour commander le mouvement des héliostats. Les méthodes de guidage diffèrent surtout par les conditions d'utilisation de courants de cellules pour obtenir finalement le mouvement des appareils. Nous reviendrons sur cette question à propos des héliostats.

Le guidage des héliostats est effectué en général, par un dispositif de contrôle (lentille, écran, et cellules d'encadrement) situé sur le trajet du rayonnement réfléchi. Ce dispositif de contrôle est fixe, et la direction lentille-centre de l'écran définit la direction du rayonnement réfléchi. L'utilisation des courants de cellule pour obtenir le mouvement des héliostats, comme d'ailleurs, celui des appareils à réception directe, peut être faite de diverses manières. Le premier montage réalisé à Mont-Louis comportait la commande de moteurs électriques par intervention d'une série de contacts de sensibilité décroissante provoquant le mouvement, dans les deux sens, de moteurs asynchrones modifiant l'un les sites, l'autre les azimuts de l'héliostat. Actuellement, des réalisations parallèles, effectuées simultanément dans différents pays (États-Unis, URSS, France, Japon, Israël, etc.), comportent la disposition schématique suivante : courant de cellule ou de phototransistor, amplification électronique de ce courant, commande de l'excitation d'une dynamo, type amplidyne ou dispositif analogue, courant continu donné par la dynamo permettant le mouvement dans les deux sens d'un moteur à courant continu. Un de ces systèmes est chargé des mouvements de site, l'autre des mouvements d'azimut. La commande électrique précédente permet de réaliser les mouvements simultanés d'un certain nombre d'héliostats asservis à un héliostat guide par liaisons mécaniques. Il ne semble pas que les asservissements par liaisons électriques aient été utilisés. La liaison mécanique peut donner une excellente précision dans l'asservissement si les arbres de transmission ont une vitesse de rotation suffisante. Il faut signaler également que certains dispositifs ne comportent pas, pour la mise en place des appareils, de moteur électrique. Les courants de cellules, amplifiés, interviennent pour modifier la position de tiroirs distributeurs ou servo-valves, admettant de l'huile sous pression dans des vérins hydrauliques à double effet commandant, l'un le site, l'autre l'azimut. Comme précédemment, deux cellules de site, haut et bas, interviennent sur les deux faces d'un même cylindre moteur, et deux cellules d'azimut, droite et gauche, interviennent sur un second cylindre. Les axes de rotation des orienteurs sont, en général, perpendiculaires. Ce système est employé pour le fonctionnement du grand orienteur de Mont-Louis et sera utilisé pour les 63 orienteurs qui doivent équiper le four solaire de 1 000 kW d'Odeillo-Font-Romeu. Son emploi est également mentionné dans le rapport S/57 de cette Conférence.

### Les réflexions planes

Diverses expériences ont montré que, pour les réflexions à longue distance, les surfaces de verre revêtues sur leurs faces avant ou arrière de réflecteurs métalliques donnaient de bons résultats. Elles paraissent supérieures aux réflecteurs constitués par des plans métalliques polis. Il ne semble pas que l'on ait expérimenté, pour la réflexion plane à longue distance, les verres plastiques métallisés ou les plastiques minces métallisés et tendus sur cadres métalliques.

Les dispositifs à orienteurs décrits dans les différentes communications comportent tous des surfaces de verre métallisé. Les dimensions de la surface unité sont choisies en fonction de divers facteurs. Dans les appareils français (Mont-Louis) et l'appareil de l'armée américaine (Natick), communication S/79, on utilise la réflexion sur la face arrière après traversée du verre. L'épaisseur du verre et sa transparence ont donc beaucoup d'importance pour le rendement de la réflexion plane. D'autre part, le support de verre doit être sensiblement plan pour les différentes positions de l'héliostat. Les épaisseurs qui permettent ce résultat sont naturellement d'autant plus grandes que la surface élémentaire est elle-même plus grande. Par ailleurs, pour éviter les pertes de lumière aux joints de glaces, il vaut mieux adopter les dimensions maxima. Pour tenir compte de tous les facteurs précédents, les dimensions et les épaisseurs adoptées sont de 50 cm × 50 cm et de 6 à 7 mm dans les appareils de Mont-Louis, de 62 cm × 62 cm et 0,635 cm dans l'appareil de Natick. La surface réfléchissante est constituée dans ces deux montages par un dépôt chimique d'argent recouvert de cuivre par électrolyse, puis par un vernis protecteur; dans l'appareil de Natick une surface adhésive aluminisée est encore ajoutée. De tels réflecteurs donnent une transmission normale d'énergie comprise entre 80 et 84 p. 100 suivant la quantité des verres, les réflexions vitreuses étant retrouvées dans le rayonnement réfléchi. Par ailleurs, la tenue de telles surfaces aux intempéries est excellente; les réflecteurs de Mont-Louis, en particulier, sont depuis 10 ans exposés à un climat rigoureux, et leurs qualités réfléchissantes sont encore excellentes.

Une autre classe de réflecteurs plans est constituée par des surfaces de verre revêtues sur leur face avant d'aluminium déposé par voie thermique. En raison du facteur de réflexion élevé qu'elles donnent, ces surfaces ont été adoptées par les auteurs du mémoire S/21 pour la construction du grand four solaire de Sendai (Japon). L'expérience relatée dans le mémoire S/21 comporte les précisions suivantes : un miroir de verre de 90 cm × 100 cm et de 10 mm d'épaisseur, argenté ou aluminisé sur sa face arrière, donne pour un rayon incident incliné à 15°, un facteur de réflexion de 67 p. 100, pour un rayon incident à 40°, un facteur de 57 p. 100. Le dépôt d'aluminium donnerait, dans les mêmes conditions, 95 p. 100 et 92 p. 100. Les surfaces d'aluminium présentent l'avantage important, en particulier pour les réactions photochimiques, de réfléchir l'ultraviolet solaire; par contre, leur tenue

aux intempéries est incertaine. On améliore leur résistance par un dépôt protecteur de protoxyde de silicium.

Un autre facteur à considérer est la résistance des glaces au choc thermique et aux contraintes mécaniques. L'expérience montre que les glaces de 1 m × 1 m et de 1 cm d'épaisseur sont thermiquement et mécaniquement bien plus fragiles que les glaces de 50 × 50 cm d'épaisseur plus faible.

L'alignement des plans réflecteurs élémentaires pour obtenir un faisceau réfléchi parallèle et continu nécessite un réglage individuel de chaque plan supporté en trois points. De tels alignements sont, en général, réalisés avec des appareils de topographie de précision en visant un point suffisamment éloigné directement et à travers la glace.

On doit tenir compte, dans l'exploitation de la réflexion plane, de l'augmentation relative des zones de pénombre en fonction de la distance entre l'orienteur et le récepteur parabolique. Ces zones n'interviennent que dans les contours extérieurs de la nappe réfléchie. La surface du récepteur parabolique doit être à l'intérieur de cette auréole d'énergie décroissante.

Il n'est pas question ici des descriptions des charpentes métalliques supportant les miroirs réflecteurs. Bien entendu, ces charpentes doivent être réalisées dans les conditions voulues pour ne pas constituer des bilames, et doivent rester planes aux différentes températures d'utilisation des appareils.

### Les réflexions convergentes

Le problème de la réalisation des surfaces réfléchissantes ou réfringentes comporte des solutions variées.

En raison de la grande ouverture indispensable pour obtenir une accumulation suffisante d'énergie, il est pratiquement exclu d'utiliser des lentilles, par ailleurs bien plus onéreuses que les miroirs. Le seul four solaire actuel à lentille, installé au California Institute of Technology, comporte d'ailleurs une combinaison de réfractions et de réflexions planes pour augmenter l'angle de convergence.

Pour les miroirs de petites dimensions, la surface réfléchissante est, en général, d'une seule pièce. Les premiers fours solaires de laboratoire ont largement utilisé les miroirs de contrôle militaire anti-aérien. Ces miroirs, de 1,50 m à 2 m de diamètre, sont soit en verre blanc spécial argenté sur la face arrière, soit en alliage métallique poli. La sévérité de leur réception leur confère une qualité optique très suffisante pour obtenir de grandes concentrations d'énergie. Ils constituent des éléments précieux pour les recherches fondamentales, soit à l'aide de fours solaires, soit à l'aide de fours à image. Les réflecteurs en aluminium peuvent être de plus grandes dimensions; le plus grand qui soit d'une seule pièce (3 m de diamètre) a été construit par Cohn à Kansas City.

D'autres miroirs d'aluminium, constitués de pièces métalliques assemblées, ont été construits (Alger). Le rapport S/16 comporte la description (figure 3)

d'un miroir léger en aluminium de 30 pieds (près de 10 m) de diamètre. Bien qu'il ne semble pas que ces appareils présentent les qualités optiques des miroirs plus petits, comme en particulier celui de Cohn, ils constituent une intéressante solution économique pour la concentration moyenne de quantités d'énergie exploitables. L'aluminium peut être préformé par emboutissage sur une forme ou plaqué sur cette forme par la pression brutale d'un gaz dégagé par une explosion (rapport S/16).

Une autre solution intéressante pour les appareils de petites et moyennes dimensions est celle de l'utilisation de plastiques. On a réalisé des formes plastiques paraboliques par solidification d'une résine sur une surface de mercure tournant à vitesse constante. L'emploi de Mylar aluminisé appuyé sur une forme de polyuréthane permet d'obtenir des miroirs de bonne qualité optique (rapport S/16, figure 5).

Dans les appareils de grandes dimensions, la réalisation de secteurs indépendants et réglés individuellement sur un support rigide commun est indispensable. On peut adopter la disposition utilisée à Mont-Louis et Alger et indiquée aussi dans le rapport S/21, figure 3. Elle présente l'avantage de comporter des éléments qui sont tous identiques dans une même couronne réfléchissante. Le nombre de types d'éléments réflecteurs est égal seulement au nombre de couronnes, ce qui permet une répétition intéressante pour la fabrication des éléments comme pour leur réglage. On peut également disposer les éléments réflecteurs sur des supports schématisant des profils paraboliques horizontaux et verticaux (appareil de Natick, rapport S/79 et appareil d'Odeillo-Font-Romeu, rapport S/48).

Le problème qui s'est posé pour la réalisation de grands fours solaires à haute concentration énergétique est celui de l'élément réflecteur unité, comme nous l'avons dit précédemment, soit suivant des couronnes concentriques, soit en alignements horizontaux sur des supports matérialisant le paraboloïde. Chacun des grands fours solaires actuellement construits ou en cours de construction a reçu, à ce point de vue, une solution différente.

Le premier four construit à Mont-Louis (France) en 1952, et qui est toujours en service, comporte des éléments situés sur des couronnes concentriques. Chaque élément supporte un certain nombre de glaces qui sont réglées individuellement. Ces glaces, initialement planes, sont assez minces pour être déformées par pression; elles sont soumises d'une manière permanente, à des poussées avant et arrière qui leur donnent approximativement la forme du petit secteur de paraboloïde qu'elles doivent occuper sur la surface réfléchissante. Il a été démontré, pour l'appareil de Mont-Louis et actuellement pour des glaces plus importantes destinées au grand four solaire de 1 000 kW d'Odeillo-Font-Romeu, que des glaces ainsi soumises à une contrainte permanente donnaient au moins la même concentration que cinq glaces planes réglées pour faire converger leurs images au foyer du système (voir rapport S/48). Dans l'appareil installé à Mont-Louis, qui comporte

cinq couronnes concentriques et 3 500 glaces soumises à une contrainte, les types d'éléments réflecteurs sont au nombre de cinq. Dans l'appareil d'Odeillo-Font-Romeu, qui aura un beaucoup plus grand nombre de glaces élémentaires, il n'y aura pas de répétition de réglage, et ce dernier sera fait sur place. Le dispositif précédent permet de construire des miroirs donnant de grandes concentrations à la condition, évidemment, que le nombre de glaces soit suffisant. Il présente, en outre, l'avantage de bloquer les glaces sur leur support, ce qui permet d'éviter toute oscillation du rayonnement réfléchi, en particulier sous l'influence du vent. Le dispositif précédent paraît être le plus économique pour la réalisation de très grands fours solaires comme celui, par exemple, d'Odeillo-Font-Romeu, dont le nombre très grand de glaces réflectrices convergentes est imposé par le choix d'éléments réflecteurs économiques à haute résistance mécanique et thermique.

Le second appareil réalisé, l'appareil d'Alger, de 8,40 m de diamètre, comporte des secteurs d'aluminium obtenus par emboutissage sur des formes rigides. Cet appareil est à réception directe, et les surfaces d'aluminium, brillantées chimiquement et soumises ensuite à oxydation anodique, réfléchissent pratiquement tout l'ultraviolet solaire qui parvient à la surface du sol. Le degré de perfection que peut donner cette méthode n'est pas encore connu. Il semble que la concentration obtenue soit égale à celles que donnent les autres types d'appareils. L'avantage principal de l'emboutissage réside dans le faible prix de revient des tôles embouties, si la quantité est suffisante pour amortir le prix des formes métalliques.

Le grand four solaire construit à Natick (Massachusetts) par l'armée américaine comporte des éléments focalisants d'un type particulier. Les surfaces élémentaires sont au nombre de 180 et sont constituées par des segments de miroirs concaves de  $62 \times 62$  cm. Elles sont alignées par profils horizontaux successifs sur un support matérialisant le paraboloïde. Chaque élément sphérique a été obtenu par affaissement, à température convenable, d'une glace déjà polie sur un moule de céramique sphérique. La face de la glace au contact de la céramique est en partie détériorée, mais la face restée libre conserve son poli et présente une bonne sphéricité. Ces miroirs sont aluminisés sur la face avant (face concave) et sont ensuite orientés individuellement pour obtenir la convergence des rayons réfléchis au foyer (voir rapport S/79).

Le grand four solaire en construction à Sendai (Japon) (voir rapport S/21) comporte 181 surfaces de verre poli, moulées à chaud dans une forme parabolique; la partie concave est ensuite aluminisée thermiquement. On ne connaît pas encore l'efficacité du procédé précédent qui s'apparente à celui utilisé pour le four solaire de Natick. Il est à remarquer, néanmoins, que les secteurs de paraboloïde réalisés doivent présenter la même qualité de surface que les secteurs sphériques de l'appareil de Natick. Étant donné qu'ils sont moulés dans la forme parabolique correspondant à leur position sur la surface réfléchis-

sante, on peut penser qu'ils donneront de hautes concentrations optiques.

Descriptions comparées des grands fours solaires : A l'exception de l'appareil d'Alger, qui reçoit directement le rayonnement solaire et semble réservé pour les études photochimiques et les réactions gazeuses, tous les fours solaires semi-industriels comportent un orienteur éclairant un miroir parabolique fixe à axe horizontal. Le seul projet qui comporte un miroir dont le rayonnement réfléchi est parallèle à l'axe du monde est décrit dans le rapport S/36, mais les dimensions de l'installation ne sont pas indiquées. La comparaison des grands fours solaires montre que les différents pays ont réalisé ou réalisent des appareils assez analogues, et dans leurs dimensions et dans leurs principes de guidage, à l'exception des surfaces focalisantes elles-mêmes (voir rapports S/79, S/21, S/48). L'appareil de Natick comporte un grand écran atténuateur placé sur le trajet du rayonnement parallèle horizontal. Les écrans de l'appareil français (Mont-Louis) sont placés sur le trajet du rayonnement convergent.

### Les concentrations d'énergie au foyer

Une des caractéristiques des générateurs solaires est que, particulièrement avec des appareils de petites dimensions, on peut obtenir des concentrations d'énergie très importantes. Ceci n'implique pas, néanmoins, d'après le rapporteur, que l'augmentation des dimensions soit un facteur défavorable pour obtenir de grandes concentrations au foyer des appareils (voir rapport S/5). Il apparaîtrait plutôt, d'après le rapporteur, que les concentrations peuvent être très grandes pour des miroirs uniques à très grande ouverture et présentant une perfection optique suffisante, mais que les appareils plus grands, à secteurs, peuvent être réalisés d'une façon aussi parfaite, en considérant comme secondaire le prix de revient. Pour de très grands appareils, la fragmentation, obligatoirement plus poussée, des éléments réflecteurs, doit conduire à des concentrations énergétiques aussi grandes que celles que donnent les petits appareils. Pour ces grands appareils, il semble que l'on puisse avoir, à la fois, des conditions de réalisation économiques et de grandes concentrations d'énergie.

Les concentrations données par les fours de petite puissance paraissent, dans certains cas, considérables. Les miroirs de 2 m, en verre, de Mont-Louis (France) donnent des flux d'énergie expérimentaux dépassant 350 calories/cm<sup>2</sup>/sec pour une énergie incidente de 1 kW par mètre carré. Rappelons que 1 kW équivaut à environ 240 calories/cm<sup>2</sup>/sec. Dans le rapport S/79, tableau 1, sont reportés des flux mesurés, donnés par différents appareils. On trouve 220 cal/cm<sup>2</sup>/sec pour l'appareil à lentilles du California Institute of Technology, 600 pour le four solaire Curtiss Wright, 864 pour le four solaire de l'URSS. Ces dernières valeurs doivent, évidemment, correspondre à des appareils d'une très haute qualité optique.

Les concentrations des fours solaires de grande puissance déterminées actuellement sont, évidem-

ment, inférieures aux précédentes. Le grand four solaire de Mont-Louis donne de 0,75 à 0,8 kW/cm<sup>2</sup>, soit un peu moins de 200 cal/cm<sup>2</sup>/sec. Le four solaire du service de l'Intendance de l'Armée des États-Unis (rapport S/79) donne un flux de 100 cal/cm<sup>2</sup>/sec. Il faut souligner que cet appareil n'a pas été fait pour obtenir de très hauts flux, mais pour réaliser une énergie aussi uniforme que possible dans la tache solaire. Il est remarquable, en particulier (voir figure 7, rapport S/79), que la concentration maximum calculée pour la zone centrale de l'appareil correspond sensiblement aux résultats expérimentaux. La courbe expérimentale montre que l'on peut avoir une énergie constante à moins de 5 p. 100 près, pour une tache de 3 cm de diamètre, et une énergie constante à 10 p. 100 près pour une tache de 4 cm de diamètre. L'appareil actuel de Mont-Louis, dont la distance focale est de 6 mètres, donne une courbe énergétique assez semblable, bien que la concentration centrale, sur quelques centimètres de diamètre, soit presque double. Il faut souligner ici que de telles variations de densité d'énergie affectent assez peu les températures d'équilibre. Rappelons ici la relation de Stéphan entre l'énergie totale  $E$  rayonnée par le corps noir et sa température,  $E = \sigma T^4$ . Nous n'avons pas encore de mesures de température concernant l'appareil en cours de construction à Dendai (Japon) (rapport S/21), mais il semble que l'on puisse espérer avoir des flux énergétiques assez importants. Les calculs effectués dans le rapport S/48, relatifs au grand four solaire français en construction à Odeillo-Font-Romeu, indiquent que l'on devrait obtenir, dans la tache centrale, compte tenu de toutes les pertes, une énergie de 1 700 watts/cm<sup>2</sup>, soit plus de 400 cal/cm<sup>2</sup>/sec. La température d'équilibre au foyer, en comptant seulement les pertes par rayonnement, serait, pour un corps noir, de 3 900 °C. Il convient, à ce sujet, de souligner que les températures d'équilibre ne sont pas les températures d'exploitation des fours solaires. Même pour des opérations de recherche fondamentale, les températures de travail utilisables, par exemple, aux environs de 3 000°, sont de plusieurs centaines de degrés au-dessous de la température d'équilibre.

### La réception de l'énergie solaire au foyer

De nombreuses publications ont été faites sur ces questions, en particulier par le laboratoire de Mont-Louis. On trouve dans l'exposé S/35 (figures 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 et 14) un certain nombre de méthodes de réception de l'énergie solaire. On en trouve également dans les mémoires S/5, S/16, S/108, S/66, S/52 et S/57. Ces méthodes peuvent se ramener à un certain nombre de modes opératoires types.

#### Réception directe

Traitement au foyer sur surfaces horizontales, inclinées ou verticales : on peut traiter, sur une surface horizontale, un corps soutenu par lui-même. C'est l'opération type en milieu oxydant et sans contamination des substances traitées.

Le procédé précédent peut être amélioré, au point de vue rendement, en déplaçant la substance sous le rayonnement, de façon à obtenir des traînées de produits fondus ou frittés de formes diverses.

On peut également apporter, d'une manière continue, de la substance pulvérulente sur la surface traitée qui est abaissée progressivement. On obtient, de cette façon, des tiges fondues dont le diamètre est sensiblement celui de l'image donnée par le système optique. Une rotation améliore la régularité des masses fondues obtenues.

Les traitements directs peuvent également s'effectuer sur des substances solides, par exemple des tiges tenues verticalement à chacune de leurs extrémités et pratiquement confondues avec l'axe focal du système optique. Le déplacement de la tige dans le sens de l'axe focal peut permettre de faire migrer une zone fondue d'une extrémité à l'autre de la tige. On peut également utiliser cette méthode la tige étant soutenue latéralement par des mâchoires refroidies (voir rapport S/52, figures 4, 5 et 7).

Une variante du traitement direct, qui permet de traiter pratiquement la totalité de la substance mise en jeu, sans contamination, est présentée dans le rapport S/35, figure 12. La matière est chauffée sur une plaque métallique (aluminium ou cuivre) à grande conductibilité calorifique et énergiquement refroidie par-dessous. On a intérêt à utiliser des lames métalliques relativement minces (quelques millimètres).

L'ensemble des méthodes précédentes peut être réalisé en milieu conditionné. L'emploi de vide exige l'utilisation de parois mécaniquement résistantes et transparentes. Pour les petites unités de chauffage, le verre Pyrex et le verre de silice, qui sont transparents au rayonnement solaire, conviennent bien. Pour les grandes unités, le problème de la paroi transparente, à grande résistance mécanique, reste posé.

Une solution intéressante et peu coûteuse, lorsque l'atmosphère conditionnée peut rester à la pression ambiante, est indiquée dans le rapport S/52, figure 3. L'énergie solaire est admise à travers un plastique gonflé par une très faible surpression du gaz constituant l'atmosphère conditionnée. Des capacités de grandes dimensions et de faibles prix, par conséquent susceptibles d'être sacrifiées à chaque opération, peuvent être réalisées avec des plastiques minces de différentes natures.

D'après les indications données dans le rapport S/35, on observe, sur les parois transparentes traversées par le rayonnement solaire, des phénomènes de photophorèse positive qui sont observables, en particulier, dans les gaz comme l'hydrogène et pour des pressions allant de quelques millimètres à 1 cm de mercure. Le phénomène ne semble pas lié au chauffage de la paroi transparente.

#### *Réception en cavité*

Le rapport S/35, ainsi que divers autres rapports (S/66, S/36, S/5, S/16), mentionnent l'intérêt de traitements en cavités, soit pour obtenir de meilleurs

rendements avec les substances réfléchissantes, soit pour obtenir des variations de température plus régulières dans un processus opératoire déterminé. Les cavités réalisées (voir rapport S/35, figures 9 et 10) se conduisent comme des corps noirs, et leurs parois internes s'échauffent régulièrement grâce à de nombreuses réflexions internes. Elles sont, en général, caractérisées par une surface intérieure beaucoup plus grande que la surface permettant la pénétration du rayonnement convergent.

Le schéma de cavité corps noir qui est particulièrement à souligner est représenté dans le rapport S/35 (figure 10). La substance, maintenue sur les parois du four par l'action de la force centrifuge, est traitée sans aucune contamination. Ce type de four, en particulier, présente les avantages du traitement en cavité et celui du traitement direct d'une substance supportée par elle-même.

Les opérations en cavité peuvent être effectuées sous vide (pour les petits appareils) ou sous gaz inerte. Il est à remarquer qu'une atmosphère conditionnée peut être réalisée, dans les fours centrifuges, par apport de gaz à l'intérieur même du four.

Le traitement en cavité se comportant comme un corps noir trouve son application pour la détermination de la répartition énergétique de l'énergie solaire sur le plan focal. Des cavités corps noirs, équipées pour des mesures calorimétriques, sont utilisées pour explorer la tache focale en différents points de sa surface, la surface de l'orifice d'accès du rayonnement pouvant être modifiée à volonté par l'interposition d'écrans réfrigérés pourvus d'orifices de diamètres différents.

### **Résultats obtenus dans le domaine des hautes températures**

L'énergie apportée sur la surface focale présente l'avantage considérable d'intervenir sur les substances sans l'intermédiaire d'aucun support matériel, mais, comme le souligne le rapport S/5, cet apport d'énergie a lieu seulement sur la surface des matériaux à traiter et ceci peut être parfois un désavantage. D'autres difficultés se présentent : celle de la faible surface sur laquelle s'effectue l'apport d'énergie; on peut y pallier par l'emploi de traitements en cavité. De même, cette méthode de traitement peut permettre d'éviter des inégalités de températures dues à une répartition énergétique décroissante dans la tache focale. Une excellente analyse des conditions opératoires nécessaires pour diverses mesures physiques et des opérations chimiques est donnée dans le rapport S/5.

#### MESURES PHYSIQUES

##### *Mesures d'énergie*

Nous avons déjà parlé, précédemment, du principe des mesures calorimétriques pour la détermination absolue du flux total apporté sur différents points de la tache focale. L'emploi de cavités « corps noir »



aussi parfaites que possible est nécessaire. La mesure de l'énergie apportée est donnée par l'échauffement d'une masse métallique en fonction du temps, ou par la différence de température produite sur un courant d'eau de débit connu. Ces expériences ont été décrites précédemment et dans le rapport S/35 par le laboratoire de Mont-Louis et sont également relatées, en particulier, dans les rapports S/16, S/5 et S/79. On aurait, suivant les auteurs, une précision de  $\pm 5$  p. 100 ou de  $\pm 2$  p. 100. Les mesures d'énergie à l'aide de *radiomètres* (Gardon ou autres) sont relatées dans les rapports S/16, S/5 et S/79. On trouvera, dans le rapport S/16, figure 9, une représentation d'un type de ces radiomètres comportant un circuit refroidissant. Ces appareils, qui ne sont pas absolus et doivent, évidemment, être étalonnés, permettent une exploration fine de la tache focale.

### Régulation et redistribution de l'énergie

La régulation de l'énergie peut être faite sur le rayonnement parallèle ou le rayonnement convergent à l'aide de stores type *jalousie* (S/79, S/16) ou d'écrans de formes diverses intervenant dans le temps suivant un programme (Mont-Louis). Le rapport S/79 mentionne l'emploi de *redistributeurs de flux* (voir figure 10) permettant d'obtenir des flux plus uniformes au point de vue énergétique. Il faut souligner que cette redistribution est effectuée avec une très importante diminution de l'énergie maximum.

### Mesures de températures

Ces mesures, très importantes, ont été effectuées soit sur des surfaces, tenant compte de leur pouvoir émissif, soit sur des cavités « corps noirs » réalisées dans des fours centrifuges ou autres. Dans tous les cas, les réflexions directes des rayons solaires sont à éviter, car elles peuvent conduire à de grossières erreurs.

Les premières mesures précises de température dans les fours solaires ont été faites par Conn. Le principe de sa méthode consiste à utiliser deux écrans tournant rapidement, l'un obturant le rayonnement solaire pendant que l'autre laisse passer le rayonnement du four, et inversement. Conn utilisait un pyromètre à disparition de filament pour repérer les brillances obtenues, évidemment très affaiblies par rapport à la brillance de la source. L'utilisation des relations de la pyrométrie et du coefficient de transmission de l'écran obturateur lui permettait de calculer la température réelle de la surface chauffée.

P. E. Glaser rappelle, dans le rapport S/16, les méthodes qu'il a publiées précédemment pour les mesures de température; le principe est dérivé de celui de Conn, mais l'emploi de cellules et d'appareils de mesures sans inertie lui permet d'avoir des mesures directes de la température pendant le temps d'obturation du rayonnement solaire.

M. Foëx (voir rapport S/66) étend largement l'emploi des appareils sans inertie et des méthodes d'écrans au contrôle des transformations physiques des substances. On trouve, en particulier dans le rapport S/66,

la détermination d'un certain nombre de points de solidification d'oxydes réfractaires chauffés en cavité tournante (fours centrifuges). Une autre méthode indiquée dans le rapport S/66 (voir figure 2) consiste à filtrer le rayonnement solaire incident à l'aide de matériaux donnant des bandes d'absorption étroites, mais très intenses. C'est à l'intérieur de ces bandes que s'effectuent, à l'aide de filtres appropriés, les mesures de température.

Les mesures de température, et particulièrement celles des points de transformation des substances, font apparaître la grande importance de la régulation de l'énergie solaire au moyen d'écrans, le contrôle étant fait alors, non en énergie, mais en température obtenue au cours d'une opération déterminée.

### Mesures d'émissivité

Elles ont été entreprises précédemment par P. E. Glaser. Dans le rapport S/66, il est mentionné également quelques mesures sur la réflectivité des corps fondus. Il serait souhaitable que les mesures sur l'émissivité et la réflectivité à diverses températures soient poursuivies.

### Mesures des propriétés thermiques (S/66, S/5, S/95, S/79)

*Chaleurs spécifiques.* Un montage a été donné précédemment par P. E. Glaser. D'autres essais effectués à Mont-Louis ont comporté l'utilisation de chambres « corps noirs » servant à échauffer le produit à examiner et à mesurer sa température avant introduction dans le calorimètre.

*Chaleurs de transformation.* Ces essais, très importants, n'ont pas encore été entrepris à l'aide des fours solaires.

*Dilatation.* Le procédé a été utilisé à Mont-Louis en chauffant les substances sous forme de baguettes à extrémités pointues, dans une cavité corps noir; la longueur de l'échantillon et sa température sont repérées optiquement. On a pu ainsi suivre, en particulier, les transformations du silicate de zirconium et de l'oxyde de zirconium.

*Conductibilité thermique.* Des essais paraissent en cours dans différents laboratoires, mais aucun résultat ne semble publié.

### Mesures physiques diverses

Il serait probablement très intéressant d'entreprendre des mesures de conductibilité électrique, de susceptibilité magnétique, d'émission thermionique, de pression de vapeur, de microscopie optique ou électronique pour lesquelles l'énergie solaire ou des rayonnements convergents seraient utilisés pour obtenir les élévations de température.

### RÉACTIONS CHIMIQUES

Nous verrons, à propos des applications industrielles, les réactions qui sont susceptibles d'être exploitées dans les grands fours solaires. Dans la

recherche fondamentale, les études chimiques au four solaire présentent un certain nombre d'aspects.

La fusion sans creuset (fusion directe ou en cavité), en milieu conditionné ou à l'air libre, permet la préparation d'innombrables mélanges binaires et ternaires de composés réfractaires divers, en vue de l'étude de leur diagramme d'état et de la définition de diverses propriétés physiques. Il est regrettable que les communications présentées à la Conférence ne comportent pas plus de résultats dans ce domaine. Signalons que le laboratoire de Mont-Louis a étudié la conductibilité électrique des mélanges  $ZrO_2 - CaO$ ,  $ZrO_2 - La_2O_3$  et les propriétés de divers produits à base d'alumine : alumine  $\beta$ , spinelles ( $Al_2O_3MgO$ ), chromites ( $Cr_2O_3MgO$ ), etc. Dans le rapport S/57 (Japon), ont été étudiées les conditions de fusion de divers oxydes :  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $CaO$  et  $ZrO_2$ . Il faut signaler également que les études sur les oxydes réfractaires classiques,  $SiO_2$  et  $Al_2O_3$  en particulier, ont permis d'étudier les rendements des fours solaires en fonction de leur puissance.

Quant aux purifications, une étude de la purification de l'alumine ( $Al_2O_3$ ) a été faite dans le rapport S/57. Il apparaît, d'après ce rapport, que les opérations sous vide permettent une bonne élimination des impuretés.

Des études de purification ont également été effectuées sur une assez large échelle au laboratoire de Mont-Louis (S/52), soit par distillation des substances, soit par élimination d'impuretés relativement volatiles, soit par cristallisation sélective ou même ségrégation, soit par fusion de zone. Ces méthodes de purification s'avèrent comme très importantes pour l'avenir des fours solaires.

Parmi les autres réactions chimiques effectuées au four solaire et conduisant à des produits nouveaux, il faut citer les résultats donnés dans les rapports S/108 et S/36. Le rapport S/108 mentionne l'emploi de techniques de haut vide au four solaire qui ont permis la mise au point de nouvelles méthodes de traitement des oxydes de terres rares et, en particulier, la préparation du protoxyde d'europium. Il faut signaler également la description d'appareils du même genre dans les rapports S/16, S/5 et S/57. Le rapport S/36 mentionne la préparation du carbure de bore et l'attaque du béryl pierreux; cette dernière opération étant relativement difficile à effectuer dans le grand four solaire d'Alger, l'auteur préconise la réalisation d'un appareil à foyer fixe. Nous répétons ici que l'étude des réactions chimiques au four solaire est encore tout à fait insuffisante en raison des programmes de recherches extrêmement riches en perspectives diverses qui ont été établis par divers laboratoires.

### Résultats obtenus en photochimie

Une première étude effectuée antérieurement à cette Conférence par Juston Coumat, à Alger, a montré l'intérêt de l'utilisation de l'ultraviolet solaire qui est concentré au foyer des appareils

possédant des surfaces réfléchissantes en aluminium. Il faut souligner que la concentration d'énergie lumineuse, photochimique sous forme de rayonnement convergent, semble avoir été utilisée pour la première fois dans ces expériences d'Alger. La méthode décrite comporte l'utilisation de divers types de sélecteurs :

a) Filtres laissant passer l'ultraviolet et réfléchissant le visible (film mince d'argent);

b) Filtre laissant passer l'ultraviolet et absorbant le visible;

c) Solution absorbant le visible et laissant passer l'ultraviolet (mélange de sulfate de cuivre et de cobalt; dans ce dernier, la solution absorbante, qui est réfrigérée, est placée sur le trajet du rayonnement convergent). L'énergie ultraviolette disponible dans le grand four d'Alger est de l'ordre de 800 watts effectifs (c'est-à-dire après filtration). Cette énergie a été utilisée en particulier pour obtenir la chloration du xylène  $C_8H_{10}$  et du benzène, avec de bons rendements.

Une seconde étude, commentée dans le rapport S/25, est effectuée avec un appareil beaucoup plus petit, donnant quelques centaines de watts de puissance totale. Cet exposé est très important pour l'avenir économique des réactions photochimiques solaires, et il convient de s'y reporter.

### Utilisations possibles des fours solaires

L'intérêt des fours solaires pour la recherche fondamentale a été souligné précédemment, et le développement de ces appareils et de leurs frères jumeaux, les fours à images, qui utilisent les mêmes techniques, est important; mais alors que les fours à images semblent devoir rester un instrument de laboratoire, même relativement puissant, on peut se poser la question du développement éventuel du four solaire à l'échelle industrielle. La première remarque que l'on peut faire est encourageante. Le rendement d'un four solaire, dans lequel l'énergie est utilisée sous sa forme initiale, est, *a priori* bien plus élevé que celui d'un moteur solaire tribulaire d'un cycle de transformations d'énergie à faible rendement. Le raisonnement précédent est aussi valable pour la transformation photochimique. On peut donc espérer, d'après ce qui précède, obtenir un amortissement du capital investi notablement plus favorable dans le cas des fours solaires que dans le cas du moteur. Une autre remarque peut être faite en s'appuyant sur les conclusions du rapport S/81. L'augmentation de puissance de « l'unité de chauffage » four solaire conduit à une augmentation de rendement des opérations à haute température qui est considérable. Les conclusions du rapport S/81, en ce qui concerne le traitement des réfractaires, sont très positives. Les quantités d'oxydes ultra-réfractaires fondues ou frittées par jour avec un four de 1 000 kW, devraient atteindre 2 à 3 tonnes, soit 2 à 3 kg par kW et par jour, alors qu'une installation de 50 kW ne produit guère que 1 kg par kW,

soit 50 kg par jour. On observe des rendements encore plus faibles pour les petites unités de 2 kW. Une installation de 1 000 kW, placée dans une zone très ensoleillée, devrait produire ainsi 1 000 tonnes de produits réfractaires. Les fours beaucoup plus puissants encore (10 000 ou 20 000 kW) n'auraient pas des rendements beaucoup plus élevés et seraient relativement plus coûteux, la construction du paraboloïde et de son support augmentant dans de plus larges proportions que la puissance de l'installation. Un certain nombre d'exemples de traitements qui ont été réalisés, au cours de ces dernières années, avec le four solaire de moyenne puissance actuellement en service à Mont-Louis (rapport S/81) peuvent être donnés. Les opérations en milieu oxydant conviennent, en particulier, fort bien au traitement de nombreux produits à base d'oxydes réfractaires. Ces traitements ont reçu un début d'application pratique au laboratoire de l'énergie solaire de Mont-Louis, où une dizaine de tonnes d'oxydes réfractaires ont ainsi été fondues ou traitées. Parmi ces produits, on doit citer le corindon, le spinelle de magnésium et le zirconate de calcium, préparés souvent à l'état pur, et parfois sous forme de monocristaux. Divers minerais ont aussi été traités à Mont-Louis au moyen des techniques permettant d'éliminer le problème des parois réfractaires dont la résistance à la corrosion est, en général, si précaire à haute température. Parmi les traitements de minerais réalisés, on peut citer : la fabrication de l'oxyde de zirconium par fusion alcaline du zircon au carbonate de sodium, le traitement du béryl ou celui du wolfram. L'avenir des fours solaires se dessine particulièrement bien aussi pour la préparation de produits purs ou de produits préparés dans des conditions particulières (milieu totalement oxydant ou totalement neutre), ou encore de produits spéciaux tels que les monocristaux. Il convient de rappeler ici que les opérations sur « front chaud » peuvent aussi avoir un avenir industriel, de même que les opérations métallurgiques qui sont relatées dans le rapport S/35. Nous pensons aussi que les réactions photochimiques peuvent conduire à des préparations rentables. Étant donné les informations fragmentées dont il dispose, le rapporteur ne peut encore établir le prix de revient au kW installé des fours solaires de diverses puissances. Il propose l'établissement de ce bilan, de même que celui des opérations effectuées, comme sujets de discussion à la Conférence.

### Sujets de discussion proposés

1. Bilan comparé des machines solaires (prix de revient, consommation d'énergie, stabilité, précision, tenue en service) :

- a) Comparaison des méthodes d'asservissement ;
  - i) Dispositifs de contrôle et d'amplification (système à cellules, système à transistors).
  - ii) Comparaison des mécanismes de commande (commandes électriques et commandes hydrauliques).
- b) Études comparées des diverses surfaces réfléchissantes planes et convergentes (surfaces planes métalliques, surfaces planes de verre, résistance des revêtements métalliques, absorption de l'énergie ; surfaces convergentes : optiquement travaillées, sphériques, paraboliques, surfaces convergentes obtenues sous contrainte).
- c) Perspectives sur les prix des machines solaires en fonction de leur puissance.
- d) Comparaison des rendements énergétiques des fours solaires et des fours à image en fonction de leur puissance.

2. Échanges de vues sur les méthodes d'utilisation de l'énergie convergente pour la production de hautes températures (mesures physiques et réactions chimiques) :

- a) Chauffage direct ;
- b) Chauffage en cavité ;
- c) Étude des parois transparentes.

3. Tentatives de bilan des fabrications susceptibles d'être effectuées économiquement à l'aide des fours solaires et pouvant conduire à des opérations industrielles :

- a) Corps réfractaires ;
- b) Métallurgie ;
- c) Réactions sur front chaud.

4. Tentatives de bilan des opérations photochimiques réalisables à l'aide des fours solaires et des fours à image de diverses sources :

- a) Conditions d'élimination ou d'atténuation des effets thermiques
- b) Propositions de réactions présentant un intérêt scientifique ou économique.

## USE OF SOLAR ENERGY FOR HIGH-TEMPERATURE PROCESSING (SOLAR FURNACES)

(Translation of the foregoing report)

Félix Trombe \*

The uses of solar energy described in this section of the Conference involve the employment of optical apparatus giving high concentrations of the energy received from direct solar radiation. The total absorption of this energy, concentrated on a relatively small surface or in a relatively small volume, results in very high local temperatures. This is the effect obtained in what are incorrectly termed "solar furnaces", by extension of the term applied to the receiving zone, which may itself be a furnace under certain circumstances, to the entire set-up, including the optical and mechanical equipment. It should also be emphasized that, for certain uses of optically concentrated solar radiation, the effect desired is not the temperature rise, which is often very injurious, but the photochemical action, due to photon absorption in certain restricted wavelength regions. The rapporteur therefore feels that the field covered by Section III.F should be extended to include all uses of *highly concentrated* solar radiation, whether they employ the total radiation, or only the energy contributed by certain wavelength regions. It should also be recalled that many of the techniques for collecting convergent solar radiation that are here described are similarly applicable to the exploitation of the thermal effects resulting from the convergence of various types of artificial radiation. These installations, termed "image furnaces" in the United States, are becoming very important in research laboratories. Convergent arrays of the type now used to concentrate solar radiation and utilize its photochemical effect might likewise be suggested for certain artificial sources with an abundant emission of wavelengths suitable for photochemical uses.

The solar energy available in direct solar radiation seems so small at first glance as to be altogether disproportionate for use in producing high temperatures. Beyond the stratosphere, there is about  $1\,350\text{ w/m}^2$  so available, and at ground level, under optimum conditions, some  $1\,000\text{ w/m}^2$ . This energy density corresponds roughly to the radiation of a black body at a temperature of only  $100^\circ\text{C}$ . Examination of the spectral distribution of energy, espe-

cially that given in figure 1 of Paper S/66, discloses better prospects. The solar energy corresponds to the radiation of a black body at about  $6\,000^\circ\text{K}$ . At ground level it is dispersed, but not degraded. The small temperature rise it induces is due to the very small solid angle of  $7 \times 10^{-5}$  steradian through which the sun "lights" the earth. A great increase in this solid angle of illumination would thus be sufficient to obtain a localization of surface energy that could yield high temperatures. This localization is realized in practice at the "focus" of an optical system of very great aperture. The maximum aperture of a paraboloid for the illumination of a plane is given by the ratio  $D/f = 4$ , where  $D$  is the diameter of the mirror and  $f$  the focal length. For illumination of a cylinder or a sphere, the value of  $D/f$  can be still further, and substantially, increased.

The high concentrations of radiation required for high temperature operations, or to localize energy for photochemical use, lead to the employment of optical systems under rather severe conditions. The axis of the system must be parallel to the incident radiation. This condition is likewise imperative for maximum incident energy reception at the various hours of the day. Since the apparent position of the sun varies during the course of a day, and is different each day, the receiving system must be constantly kept oriented if the above conditions are to be satisfied. Two methods have been used for this purpose :

1. The optical "concentrator" (parabolic mirror or lens) is turned directly towards the sun.
2. The optical "concentrator" is fixed and receives the solar radiation following its axis by means of a moving plane "orienting" mirror.

The principal shortcoming of solar radiation for practical uses is its intermittence, whether regular (sequence of days and nights), or accidental, due to interposition of clouds or fogs, screening the terrestrial surface from the sun. In many regions between the tropics and the temperate zone, a solar "breakdown" is rare, but the daily intermittence leads one to envisage either operations that can be completed during a daily radiation cycle, or operations involving no thermal mass, which can be rapidly started and stopped.

\* Research Director, Centre national de la recherche scientifique, Paris.

A study of the papers submitted to this section, and of various earlier work, leads to the adoption of the following classification for this report:

1. Solar machines.
  - (a) Direct receivers, oriented receivers and their heliostats.
  - (b) Plane reflections.
  - (c) Convergent reflections.
  - (d) Comparative description of large solar furnaces.
2. The concentration of solar energy at the focus.
3. The reception of solar energy at the focus.
4. Results obtained in the high-temperature region.
  - (a) Physical measurements.
  - (b) Chemical reactions.
5. Results obtained in photochemistry.
6. Possible uses for solar furnaces.

### Solar machines

#### DIRECT RECEIVERS, ORIENTED RECEIVERS AND THEIR HELIOSTATS

1. Direct reception has the advantage of only involving a single reflection on the mirrors that concentrate the radiation. Various types of direct receivers will be found in figure 1 of Paper S/16. The principal disadvantage of this type is the fact that the axis of convergence of the radiation is displaced in space, and, consequently, that the focus, located on this axis, is also displaced in space. This arrangement is also unfavourable, since the convergent radiation attacks substances from down to up, or laterally, and it is difficult to perform certain operations, for instance melting, with such apparatus. On the other hand, for operations on solid surfaces, reaction between gases, cracking, etc., direct reception is the simplest method. In some assemblies (Meudon apparatus, 1946), the image of the sun is reflected downward by means of a plane mirror placed in the path of the convergent rays. It should also be noted that direct reception may be viewed more favourably for apparatus with a smaller aperture than paraboloids and using lenses. The only solar furnace using lenses that has been built and is in operation, at the California Institute of Technology, moves about its focus, which is itself fixed in space.

2. The reception of the solar radiation by a plane orienting mirror, followed by a fixed parabolic mirror, was first put into practice by Cohn, and later by the Mont-Louis Laboratory. This method can now be generalized for most laboratory devices and large-scale installations. It has the considerable advantage of having a fixed focus of orientation, whether horizontal, vertical or inclined, that may be selected according to the operation being performed.

3. In order to keep the optical axis of direct receivers pointing in the direction of the sun, they may be guided either by an astronomical method

or by a control mechanism with cells or transistors. Some installations, especially the large solar furnace of Algiers, are mounted on an equatorial axis whose motion is controlled by an astronomical clock. This method has the advantage of holding the axis of the paraboloid in the direction of the sun, even if the solar radiation is briefly intercepted by a cloud. The declination of the mirror is naturally adjusted daily by hand. It would seem that this method of control would be rather expensive for large machines like the one at Algiers. Nevertheless it appears to have been checked for small devices by Peter E. Glaser (Paper S/16). The collector mirrors are often automatically trained on the sun by using an auxiliary lens with its optical axis parallel to that of the paraboloid. A circular screen  $R$ , located in the focal plane and substantially of the same size as the solar image given by the lens, is surrounded by four control photocells or transistors, operating pairwise to control the two directions in elevation and the two directions in azimuth. A slight displacement of the solar image to outside the screen  $E$  illuminates one or two of the control photocells. This arrangement has been universally adopted for guidance of direct receivers, or, as we shall see, to control the motion of heliostats. The methods of guidance differ primarily in the conditions under which the currents from the cells are used to produce the ultimate motion of the mirrors. We shall return to this question when discussing heliostats.

4. Heliostats are, in general, guided by a control system (lens, screen, and framing cells) located in the path of the reflected radiation. This control arrangement is fixed, and the direction from the lens to the screen centre defines the direction of the reflected radiation. The photocell currents may be used in various ways to cause motion of the heliostat or the direct reception devices. The first Mont-Louis model controlled electric motors by means of a series of contacts of decreasing sensitivity, which initiated the operation, in either sense, of asynchronous motors, one adjusting the elevation, the other the azimuth, of the heliostat. Parallel developments, simultaneous in different countries (United States, USSR, France, Japan, Israel, etc.), today employ the following schematic arrangement: current from a photocell or phototransistor, electronic amplification of this current, control of the excitation of a dynamo, of amplidyne type or similar device, direct current generated by the dynamo, running a direct current motor in either sense. One of these systems controls the changes of elevation, the other the changes of azimuth. This electrical command system permits realization of simultaneous motion of a certain number of heliostats controlled by a master heliostat using mechanical coupling. Electronic coupling does not seem to have been used. Mechanical coupling can ensure excellent accuracy of control if the transmission shafts run at adequate rotary speed. It should also be mentioned that certain devices do not include an electric motor for aligning the machines. The amplified photocell currents act to change the position of distributor

slides or servo-valves, admitting oil under pressure into double-action hydraulic jacks, one controlling the elevation and the other the azimuth. As before, two elevation photocells, upper and lower, act on the two faces of the same actuating cylinder, while two azimuth photocells, right and left, act on the second cylinder. The axes of rotation of heliostats are in general perpendicular. This system is used to operate the large Mont-Louis heliostat and will be used for the 63 heliostats to be installed at the 1 000 kW solar furnace at d'Odeillo-Font-Romeu. It is also mentioned in Paper S/57 of this Conference.

#### PLANE REFLECTIONS

1. Various experiments have shown that for long distance reflections, glass surfaces coated on their front or rear faces with metallic reflectors give good results. They appear to be better than reflectors made of polished metal planes. Metallized plastic glass or metallized plastic film stretched on metal frames do not seem to have been tried for long distance plane reflection.

2. The heliostats described in various papers all use surfaces of metallized glass. The dimensions of the unit surface are selected on the basis of various factors. The French installations (Mont-Louis) and the United States Army installation (Natick) of Paper S/79, use the reflection on the rear surface after passing through the glass. The thickness and transparency of the glass are thus very important for the efficiency of the plane reflection. On the other hand, the mounting of the glass must be substantially plane for the various positions assumed by the heliostat. The thickness permitting this result will naturally be greater, the larger the elementary surface itself. Moreover, to avoid losses of light at the glass interfaces, it is better to adopt the maximum dimensions. To give effect to all these factors, the dimensions adopted are  $50 \times 50$  cm by 6 to 7 mm thickness in the Mont-Louis installations, and  $62 \times 62$  cm by 0.635 cm at Natick. In these two set-ups, the reflecting surface consists of a layer of chemically deposited silver electrolytically coated with copper, and then coated with a protective varnish. At Natick one aluminized adhesive surface is also used. The normal transmission of energy by such reflectors is from 80 to 84 per cent, according to the number of glass plates, the vitreous reflections being recovered in the reflected radiation. The behaviour of such surfaces in bad weather is excellent. The Mont-Louis reflectors, in particular, have been exposed for the last ten years to a severe climate, and yet their reflecting properties are still excellent.

3. Another class of plane reflectors consists of glass surfaces coated on the front face with thermally deposited aluminium. Owing to their high reflectivity, these surfaces were adopted by the authors of Paper S/21 for the large solar furnace at Sendai (Japan). The experience they reported includes the following details: a glass mirror  $90 \times 100$  cm, by 10 mm thick, with silvered or aluminized rear face, had a reflection factor of 67 per cent for an incident ray at

a  $15^\circ$  inclination, and one of 56 per cent for an incident ray of  $40^\circ$ . The aluminium deposit under the same conditions gives 95 and 92 per cent respectively. Aluminium surfaces have the important advantage, especially for photochemical reactions, of reflecting solar ultraviolet radiation. On the other hand, their resistance to bad weather is uncertain. This resistance is improved by a protective deposit of silicon monoxide.

4. Another factor to be considered is the resistance of glass to thermal shock and mechanical stress. Experience shows that glass sheets  $1 \times 1$  m by 1 cm thick are much more fragile, thermally and mechanically, than glass plates  $50 \times 50$  cm but less thick.

5. The alignment of the elementary reflecting planes to obtain a parallel and continuous reflected beam requires individual alignment of each plane supported at three points. Such alignments are in general accomplished with precise topographic instruments, by sighting a point sufficiently distant directly and through the glass.

6. In the use of plane reflection, one must take account of the relative increase in the penumbral zones with increasing distance between the heliostat and the parabolic reflector. These zones act only on the outer contours of the reflected images. The surface of the parabolic reflector must be inside this aureole of decreasing energy.

7. The metal framework supporting the reflecting mirrors cannot be described here. Such frameworks must of course be built under the desired conditions so as not to form double sheets and must remain plane at the various operating temperatures of the installations.

#### CONVERGENT REFLECTIONS

The problem of creating reflecting or refracting surfaces has various solutions:

1. The large aperture which is necessary to get appropriate accumulation of energy practically rules out the use of lenses, which are, incidentally, considerably more expensive than mirrors. The only solar furnace that uses lenses today is at the California Institute of Technology. It employs a combination of refractions and plane reflections to increase the angle of convergence.

2. For small mirrors, the reflecting surface is usually in a single piece. The first laboratory solar furnaces made extensive use of military anti-aircraft mirrors. Such mirrors, 1.5 to 2 m in diameter, are made either of special water-white glass, silvered on the rear face, or of a polished alloy. Because of the severity of the specifications, their optical quality is entirely adequate for high concentration of energy. They are valuable for fundamental research with either solar furnaces or image furnaces. Aluminium reflectors may be larger. The largest one in a single piece (3 m in diameter) was built by Cohn at Kansas City.

3. Other aluminium mirrors, made up of arrays of metal segments, have been constructed (Algiers).

Paper S/16 describes a light aluminium mirror 30 feet (about 10 m) in diameter (figure 3). Although they do not appear to have the optical qualities of smaller mirrors, especially that of Cohn, they do constitute an interesting and economical solution for moderate concentration of useful amounts of energy. The aluminium sheets may be fabricated by drawing on a mould or explosive forming on a mould by the sudden and violent pressure of a gas liberated by an explosion (Paper S/16).

4. Another interesting solution for small and medium size equipment is the use of plastics. Parabolic plastic moulds have been produced by solidification of a plastic resin on a mercury surface rotating at constant velocity. The use of aluminized Mylar on a polyurethane mould gives mirrors of good optical quality (figure 5, Paper S/16).

5. Large installations require the use of separate sectors, individually aligned on a rigid common mounting. The arrangement used at Mont-Louis and Algiers, which is also mentioned in Paper S/21, figure 3, may be adopted. It has the advantage that all the elements in a single reflecting ring are identical. There are only as many types of reflecting elements as there are rings, thus permitting advantageous duplication in the fabrication and alignment of the elements. The reflecting elements may also be aligned on mounts outlining horizontal and vertical parabolic profiles (Natick installation, Paper S/79) (d'Odeillo-Font-Romeu installation, Paper S/48).

6. The problem posed by the design of large solar furnaces with high concentration of energy is that of the unit reflector element, as already mentioned, whether used in concentric rings, or in horizontal alignment on mountings, to form the paraboloid. Each of the large solar furnaces that have been built or are now under construction has embodied a different solution in this respect.

The first solar furnace, built at Mont-Louis, France, in 1952, which is still in service, comprises elements positioned on concentric rings. Each element supports a number of glass plates which are individually aligned. These glass plates, which are plane at first, are thin enough to be deformed by pressure, and they are permanently subjected to pressures in front and behind, giving them the approximate shape of a small sector of the paraboloid to be occupied on the reflecting surface. It has been demonstrated by the Montlouis installation, and now by the larger glass plates for the large 1 000 kW solar furnace of Odeillo-Font-Romeu, that glass plates so subject to permanent stress give at least the same concentration as five plane glass plates so adjusted that their images converge at the focus of the system (see Paper S/48). The Mont-Louis installation, comprising five concentric rings and 3 500 glass plates under stress, has five types of reflecting elements. At the Odeillo-Font-Romeu installation, which will have a much larger number of glass elements, there will be no repetition of the alignment, which will be done on the site. This arrangement makes it possible

to construct mirrors giving high concentrations, subject to the obvious condition that the number of glass plates is sufficient. It also has the advantage of holding the glass plates firmly in place on their mountings, thus avoiding all oscillation of the reflected radiation, especially under the action of the wind. This arrangement appears to be the most economic for very large solar furnaces, such as the one at Odeillo-Font-Romeu, which has a very large number of convergent reflecting glass elements, made necessary by the choice of economic reflecting elements of high mechanical and thermal resistance.

The second installation built, the one at Algiers, is 8.40 m in diameter, and is composed of aluminium sectors produced by stamping on rigid dies. This installation is a direct reception model, and the aluminium surfaces, chemically polished and then anodically oxidized, reflect practically all the solar ultraviolet that reaches the ground. The degree of perfection that can be given by this method is not yet known. The concentration is apparently the same as that yielded by other types. The principal advantage of stamping is the low cost of stamped sheet if the quantity is large enough to amortize the cost of the dies.

The large solar furnace built at Natick, Massachusetts, by the United States Army, has focusing elements of a peculiar type. There are 180 elementary surfaces, formed of concave mirror segments  $62 \times 62$  cm. They are aligned in successive horizontal profiles on a mounting holding the paraboloid. Each spherical element was produced by forming, at a suitable temperature, a glass plate already polished, against a spherical ceramic mould. The glass face in contact with the ceramic deteriorates partly, but the free face retains its polish and has a good sphericity. These mirrors are aluminized on the front (concave) face and are then individually aligned to cause the reflected rays to converge at the focus (see Paper S/79).

The large solar furnace under construction at Sendai, Japan (see Paper S/21) consists of 181 polished glass surfaces, hot moulded into paraboloidal shape. The concave faces were then thermally aluminized. The merits of this process, which resembles the one used for the Natick solar furnace, are not yet known. It should, nevertheless, be noted that the sectors of the paraboloid should present the same surface finish as the spherical sectors of the Natick installation. Since they are moulded into the parabolic shape corresponding to their position on the reflecting surface, there is reason to think that they will give high optical concentrations.

Comparative descriptions of large solar furnaces: With the single exception of the Algiers installation, which directly receives the solar radiation and appears to be intended for photochemical studies and gas reactions, all semi-industrial solar furnaces have a heliostat reflecting the sunlight on to a fixed parabolic mirror with a horizontal axis. The only plant whose mirror reflects the radiation in a direction parallel to the celestial axis is that described in S/36,

but this paper fails to give the dimensions of the installation. A comparison of the large solar furnaces shows that the plants developed or being developed by the various countries resemble each other rather closely in dimensions and principles of tracking, except for the focusing surfaces themselves (see S/79, S/21 and S/48). The Natick installation includes a large attenuator screen placed in the path of the parallel horizontal radiation. The screens of the French installation (Mont-Louis) are placed in the path of the convergent radiation.

### The energy concentrations at the focus

One characteristic of solar generators is that, especially with small ones, very great concentrations of energy may be obtained. In the rapporteur's opinion, nevertheless, this does not imply that an increase in size is a factor unfavourable to the procurement of high concentrations at the focus (see Paper S/5). It would seem, rather, according to the rapporteur, that the concentrations may be very great for single mirrors of very great aperture and optically perfect enough, but that the larger models, using sectors, may be realized just as perfectly, provided cost is no object. For very large solar furnaces, the subdivision of the reflecting elements, which is necessarily more advanced, should give energy concentrations as high as those from the smaller ones. For these large installations, it seems that economic conditions of realization and high concentrations of energy are simultaneously possible.

The concentrations given by low-power furnaces appear in some cases to be very substantial. The 2 m glass mirrors at Mont-Louis, France, give experimental energy fluxes in excess of 350 cal/cm<sup>2</sup>/sec for an incident energy of 1 kW/m<sup>2</sup>. We recall that 1 kW is equivalent to about 240 cal/m<sup>2</sup>/sec. Table 1 of Paper S/79 gives the measured fluxes for various furnaces. The lens solar furnace at the California Institute of Technology has a flux of 220 cal/cm<sup>2</sup>/sec; the Curtiss-Wright solar furnace has 600, and the USSR solar furnace 864. These latter values must obviously correspond to apparatus of very high optical quality.

The concentrations of high-power solar furnaces determined today are clearly below these levels. The large solar furnace of Mont-Louis gives 0.75 to 0.8 kW/cm<sup>2</sup>, or a little less than 200 cal/cm<sup>2</sup>/sec. The Quartermaster solar furnace (Paper S/79) gives a flux of 100 cal/cm<sup>2</sup>/sec. It should be emphasized that this furnace was not designed to obtain very high fluxes, but to realize the most uniform energy possible in the solar spot. It is especially noteworthy that the maximum concentration calculated for the central zone of the furnace should be substantially in agreement with the experimental results. The experimental curve shows that energy constant to within less than 5 per cent may be obtained for a spot 3 cm in diameter, and energy constant to within 10 per cent for a spot 4 cm in diameter. The present Mont-Louis furnace, which has a focal length of 6 m, gives a rather

similar energy curve, although the central concentration, several centimeters in diameter, is almost double. We must stress the fact that such variations in energy density have only a rather slight effect on the equilibrium temperatures. We recall the Stefan relation between the total energy  $E$  radiated by a black body and its temperature:  $E = \sigma T^4$ . The temperature measurements for the plant now under construction at Sendai, Japan (Paper S/21) are as yet unavailable to us, but it would seem that rather high energy fluxes may be expected. The calculations given in Paper S/48 on the large French solar furnace under construction at Odello-Font-Romeu indicate that, allowing for all the losses, an energy of 1700 w/cm<sup>2</sup>, or over 400 cal/cm<sup>2</sup>/sec, should be obtained in the central spot. The equilibrium temperature of the focus, counting only the radiation losses, would be 3900°C for a black body. In this connexion we must stress the fact that the equilibrium temperatures are not the operating temperatures of solar furnaces. Even for fundamental research work, the working temperatures used, for instance, in the neighbourhood of 3000°, are several hundred degrees below the equilibrium temperature.

### The collection of the solar energy at the focus

There are numerous publications on these subjects, especially by the Mont-Louis Laboratory. A number of methods of collecting the solar energy will be found in S/35 (figures 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 and 14). They will also be found in Papers S/5, S/16, S/108, S/66, S/52 and S/57. These methods may be reduced to a number of typical operating patterns.

#### DIRECT COLLECTION

1. Treatment at the focus, on horizontal, vertical or inclined surfaces.—A self-supporting body may be treated on a horizontal surface. This is the typical operation in an oxidizing medium, and involves no contamination of the substances treated.

2. The efficiency of this procedure may be improved by displacing the substance being irradiated, so as to obtain belts of melted or fritted products in various shapes.

3. The powdered substance may likewise be spread continuously on the treated surface, which is progressively lowered. In this way one obtains melted rods of substantially the same diameter as the image cast by the optical system. Rotation makes the melted masses more regular.

4. Direct treatments may likewise be applied to solid substances, for instance to rods held vertically at each end, practically collinear with the focal axis of the optical system. By shifting the rod in the direction of the focal axis, a molten zone may be made to migrate from one end of the rod to the other. This method may also be used when the rod is supported laterally by cooled jaws (see Paper S/52, figures 4, 5 and 7).



5. Paper S/35, figure 12, presents one version of direct treatment permitting treatment of practically all the substance, without contamination. The material is heated on a metal plate (aluminium or copper) of high thermal conductivity, and vigorously cooled on the bottom. It is advantageous to use relatively thin metal plates (several millimetres thick).

6. All the above methods may be employed in a controlled atmosphere. The use of vacuum requires mechanically resistant and transparent walls. For small heating units, Pyrex glass and silica glass, both of them transparent to solar radiation, are very suitable. For large units, the problem of the transparent wall with high mechanical resistance still remains open.

7. The following is an interesting and inexpensive solution. In cases where the controlled atmosphere may remain under ambient pressure, Paper S/52, figure 3, indicates that the solar energy is admitted through a plastic membrane inflated by a very slight overpressure of the gas constituting the controlled atmosphere. Such containers, of large dimensions and low cost, which are consequently economically expendable for each operation, may be made of thin plastic films of various kinds.

8. According to Paper S/35, phenomena of positive photophoresis are observed on transparent walls through which the solar radiation passes, especially in gases like hydrogen, at pressures from several millimetres to 1 cm Hg. This phenomenon does not appear to be connected with the heating of the transparent wall.

#### CAVITY RECEPTION

1. Paper S/35, and several others — S/66, S/36, S/5 and S/16 — mention the advantage of treatment in cavities, either to obtain better yields with reflecting substances, or to get more regular variations of temperature in a given operation. The cavities developed (see S/35, figures 9 and 10) behave like black bodies, and their inner walls heat up regularly, owing to the numerous internal reflections. They are in general characterized by an internal surface much larger than the outer surface, permitting the penetration of convergent radiation.

2. The scheme of black-body cavity that should be especially emphasized is represented in S/35 (figure 10). The substance, held against the furnace walls by the action of the centrifugal force, is treated with no contamination whatsoever. This type of furnace, in particular, affords the advantages of cavity treatment and of direct treatment of a self-sustaining substance.

3. Cavity operations may be conducted *in vacuo* (for small devices) or in an inert gas. It should be noted that a controlled atmosphere may be realized in centrifugal furnaces by supplying the gas to the furnace interior itself.

4. Treatment in a cavity behaving like a black body finds application in determining the energy distri-

bution of the solar energy on the focal plane. Black-body cavities equipped for calorimetric measurements are used to explore the focal spot at different points of its surface, since the surface of the radiation-access orifice can be modified at will by interposing refrigerated screens provided with orifices of various diameters.

#### Results obtained in the high temperature field

The energy supplied to the focal plane affords the considerable advantage of acting on the substances without passing through any intermediate material support. But, as emphasized by S/5, this supply of energy is only on the surface of the materials to be treated, and this may sometimes be a disadvantage. There are other difficulties as well. The energy is supplied to a very small surface. This disadvantage may be palliated by cavity treatment. Similarly, this method of treatment avoids the temperature inequalities due to a decreasing energy distribution in the focal spot. S/35 gives an excellent analysis of the operational conditions required for various physical measurements and chemical operations.

#### Physical measurements

1. Energy measurements: We have already mentioned the principle of calorimetric measurements for the absolute determination of the total incident flux on the various points of the focal spot. It is essential to have black-body cavities as perfect as possible. The measure of the incoming energy is given by the heating of a metal mass as a function of the time, or by the temperature difference produced in a current of water of known rate of flow. These experiments have been described previously, and in Paper S/35, by the Mont-Louis Laboratory, and are also discussed in particular in S/16, S/5 and S/79. The accuracy according to the authors is  $\pm 5$  per cent or  $\pm 2$  per cent. These three papers also describe the energy measurements by radiometers (Gardon *et al.*). One type of such radiometers, including a cooling circuit, is shown in figure 9 of S/16. These instruments, which are not absolute and must, of course, be calibrated, allow detailed exploration of the focal spot.

2. Regulation and redistribution of the energy: The energy may be regulated on parallel or convergent radiation by means of venetian blinds (S/79, S/16), or of screens of various shapes interposed after a programme (Montlouis). S/79 mentions the use of flux redistributors (see figure 10) to give the fluxes a more uniform energy distribution. We must emphasize the very great energy decrease involved in this redistribution.

3. Temperature measurements: These very important measurements were made, either on the surfaces, taking their emissivity into account, or on black-body cavities in centrifugal or other furnaces. In all cases the direct reflection of the solar rays must be avoided, since it may lead to gross errors.

(a) The first precise temperature measurements in solar furnaces were made by Conn. The principle of his method comprises the use of two rapidly rotating screens, one cutting off the solar radiation while the other passes the furnace radiation, and vice versa. He uses a disappearing-filament pyrometer to measure the brightness, obviously very low compared to the brightness of the source. Using the pyrometric relations and the transmission factor of the rotating screen, he calculates the real temperature of the heated surface.

(b) P. E. Glaser, in Paper S/16, recalls the methods of temperature measurement previously published by him. The principle is derived from that of Conn, but the use of photocells and inertialess measuring instruments permits direct temperature measurements during the period of interruption of the solar radiation.

(c) M. Foëx (Paper S/66) greatly extends the use of inertialess devices and screen methods to the study of the physical transformations of substances. He has found a number of solidification points of refractory oxides heated in rotating cavities (centrifugal furnaces), especially in S/66. Another method mentioned in that paper (see figure 2) is to filter the incident solar radiation through materials with narrow but very intense absorption bands. Within these bands the temperature measurements are made by the aid of suitable filters.

4. The temperature measurements, especially the measurements of the transformation points of substances, show the great importance of regulating the solar energy by means of screens, and checking the operations, not with respect to energy, but to the temperature obtained.

5. P. E. Glaser previously made emissivity measurements. S/66 also mentions several measurements of the selectivity of molten bodies. The measurements of emissivity and reflectivity at various temperatures should be continued.

6. Measurements of thermal properties (see Papers S/66, S/5, S/95 and S/79).

Specific heat: A set-up for this purpose has been given earlier by P. E. Glaser. Other tests at Mont-Louis have used black-body chambers to heat the product under examination and to measure its temperature before it is placed in the calorimeter.

Heat of transformation: These very important experiments have not yet been undertaken by the aid of the solar furnace.

Thermal expansion: This method has been utilized at Mont-Louis. The substances, in the form of rods with pointed ends, are heated in a black-body cavity. The length and temperature of the specimen are found optically. In this way, in particular, the transformations of zirconium silicate and zirconium oxide have been followed.

Thermal conductivity: Experiments are now in progress in various laboratories, but no result appears to have been published yet.

7. Various physical measurements: It would probably be of very great interest to make measurements of electrical conductivity, magnetic susceptibility, thermionic emission, and in optical or electron microscopy, while using solar energy convergent radiation to increase the temperature.

Chemical reactions: When we come to the industrial applications, we shall discuss reactions that can be exploited in large solar furnaces. In fundamental research, chemical studies in the solar furnace have a number of aspects.

1. Melting without a crucible (direct melting or melting in a cavity), in a controlled atmosphere or in the free air, permits the preparation of innumerable binary and ternary mixtures of various refractory compounds, in order to study their phase diagrams and to determine various physical properties. It is to be regretted that the papers presented to this Conference do not give more results in this field. We may mention that the Mont-Louis Laboratory has studied the electrical conductivity of  $ZrO_2$ -CaO and  $ZrO_2$ - $La_2O_3$  mixtures, and the properties of various products based on alumina, alumina  $\beta$  spinels ( $Al_2O_3$ -MgO), chromites ( $Cr_2O_3$ -MgO), etc. The author of S/57 (Japan) has studied the melting conditions for various oxides:  $Al_2O_3$ , MgO, CaO and ZrO. It should also be noted that studies on the conventional refractory oxides especially  $SiO_2$  and  $Al_2O_3$ , have permitted study of the efficiency of solar furnaces as a function of their power.

2. Purification: S/57 concerns a study of the purification of alumina ( $Al_2O_3$ ). It appears from this paper that operations *in vacuo* permit good elimination of the impurities.

Purification studies on a fairly large scale have been run at the Mont-Louis Laboratory (S/52), using the methods of distillation, of elimination of the relatively volatile impurities, of fractional crystallization or even segregation, and of zone melting. The great importance of these methods of purification for the future of solar furnaces has now been established.

3. Among the other chemical reactions accomplished in the solar furnace, which have led to the new products, we must cite the results given in Papers S/108 and S/36. S/108 mentions the use of high-vacuum technique in the solar furnace, which has led to the development of new methods of treating rare-earth oxides, with special reference to the preparation of europium protoxide. The description of devices of the same kind in S/16, S/5 and S/57 must also be noted. S/36 mentions the preparation of boron carbide and the attack on stony beryl. This latter operation was accomplished with relative difficulty in the large solar furnace at Algiers, and the author now envisages a fixed-focus plant. We must repeat here that the study of chemical reactions in the solar furnace is still entirely inadequate, in view of the research programmes that are so extremely promising, which have been drafted by the various laboratories.

## Results in photochemistry

An initial study performed prior to this Conference by Justin Coumat at Algiers has shown the advantage of using ultraviolet radiation, concentrated at the focus of an installation with aluminium reflecting surfaces. It must be emphasized that the concentration of luminous, photochemical energy in the form of convergent radiation seems to have been utilized for the first time in these Algiers experiments. The method described comprises the use of various types of selectors:

1. Filters passing the ultraviolet and reflecting the visible light (thin silver film);
2. Filter passing the ultraviolet and absorbing the visible light;
3. Solution absorbing the visible light and passing the ultraviolet (mixture of copper and cobalt sulfates; in the latter, the cooled absorbing solution is placed in the path of the convergent radiation). The ultraviolet energy available in the large Algiers furnace is of the order of 800 watts effective (that is, after filtration). This energy has been utilized, more particularly, in the chlorination of xylene,  $C_8H_{10}$ , and of benzene, in good yield.

A second study, on which S/25 comments, was performed on a much smaller device, with a total power of several hundred watts. This paper is very important for the economic future of solar photochemical reactions, and the reader should refer to it.

## Possible utilization of solar furnaces

The interest inherent in solar furnaces for fundamental research has already been emphasized, *supra*, and the development of these devices and their twin brothers, the image furnaces, which utilize the same techniques, is important. But while image furnaces seem destined to remain laboratory instruments, the question of the ultimate development of the solar furnace on the industrial scale may already be raised. The first remark that anyone can make is encouraging. The efficiency of a solar furnace, which utilizes the energy in its initial form, is *a priori* considerably higher than that of a solar engine, which must follow a whole cycle of low-efficiency transformations of energy. This reasoning also applies to photochemical transformation. The amortization of invested capital may thus be expected to be considerably faster in the case of solar furnaces than in that of solar engines. Relying on the conclusions of S/81, another remark may be made. An increase in the power of the "heating unit" solar furnace yields a substantial improvement in the efficiency of high temperature operations. The conclusions of this paper on the treatment of refractories are very favourable. The amount of ultra-refractory oxides melted or fritted per day with a 1 000 kW furnace should reach 2 to 3 metric tons, or 2 to 3 kg per kW per day, while a 50 kW plant produces only 1 kg/kW, or 50 kg/day. The efficiencies observed with small 2 kW units are even smaller. A 1 000 kW

plant, installed in a highly insulated zone, should thus produce 1 000 metric tons of refractory products. Still more powerful furnaces (10 000 or 20 000 kW) would not have much higher efficiencies and would be relatively more expensive, since the construction cost of the paraboloid and its mounting increases more rapidly than the power of the installation. One might cite a number of examples of the treatments that have been performed during the last few years with the medium power solar furnace now operating at Mont-Louis (Paper S/81). The operations in an oxidizing atmosphere are in particular very appropriate for treating many products based on refractory oxides. These treatments were first practically applied at the Solar Energy Laboratory of Mont-Louis, where some twelve metric tons of refractory oxides have been fused or treated. These products include corundum, magnesium spinel, and calcium zirconate, often prepared in the pure state, sometimes even as monocrystals. Various minerals have also been treated at Mont-Louis by methods dispensing with refractory walls, with their generally precarious high-temperature corrosion-resistance. Among these treatments of minerals, we may mention: production of zirconium oxide by alkaline fusion of zircon with sodium carbonate, the treatment of beryl, or that of tungsten. The future of the solar furnace also appears particularly bright for the preparation of pure products or of products prepared under special conditions (totally oxidizing or totally neutral medium), or of special products, such as monocrystals. It is appropriate to recall, in this place, that the operations on a "hot front" may also have an industrial future, like the metallurgical operations reported in S/35. We are also of the belief that photochemical reactions may lead to economically feasible methods of preparation. In view of the fragmentary information available to him, the rapporteur is as yet unable to establish the capital cost, per installed kW, of solar furnaces of various power outputs. He proposes that the establishment of this capital cost, and of the operations effected, be adopted as a subject of discussion at the Conference.

## Topics of discussion proposed for section III.F

1. Comparative review of solar machines (cost, energy consumption, reliability, precision, performance):

A. Comparison of tracking methods:

1. Control and amplification systems (system using photocells, system using transistors)
2. Comparison of drives (electric drive, hydraulic drive).

B. Comparative studies of various plane and convergent reflecting surfaces (plane metal surfaces, plane glass surfaces, resistance of metal coatings to corrosion, etc., energy absorption; convergent surfaces (optically treated, spherical, parabolic, convergent surfaces obtained under mechanical stress).

C. Prospective developments in the cost structure of solar machines as related to their power.

D. Comparison of energetic efficiencies of solar furnaces and of image furnaces as related to their power.

2. Exchange of views on the methods of utilizing convergent energy to produce high temperatures (physical measurements and chemical reactions).

A. Direct heating

B. Heating in cavity

C. Study of transparent walls

3. Attempt at analysis of manufacturing operations that could be economically performed by the

aid of the solar furnace, and might be industrially developed :

A. Refractories

B. Metallurgy

C. Hot-front reactions

4. Attempted balance sheet of photo-chemical operations that could be realized by means of solar furnaces and image furnaces using various sources of energy :

A. Conditions for eliminating or attenuating the thermal effects

B. Suggested reactions of scientific or economic interest.

# APPLICATION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE AUX OPÉRATIONS A HAUTE TEMPÉRATURE (FOURS SOLAIRES)

## Résumé du rapporteur

Comme l'indique le rapport général, les usages de l'énergie solaire décrits au titre du point III.F de l'ordre du jour comportent l'intervention d'appareils d'optique permettant de grandes concentrations de l'énergie apportée par le rayonnement solaire direct. Cette concentration peut conduire, soit à des températures élevées par utilisation du rayonnement total, soit à des effets photochimiques intenses qui sont dûs à l'intervention de rayonnements concentrés correspondant seulement à certains intervalles de longueur d'onde. Ces deux questions seront examinées séparément.

La production de hautes températures par action du rayonnement solaire et leur utilisation forment le sujet de la grande majorité des communications présentées au titre du point III.F et des discussions et interventions des séances. Quelques conclusions se dégagent de cet ensemble.

La tendance générale des opinions exposées, que l'on retrouve d'ailleurs dans les interventions relevant de divers autres points de l'ordre du jour, est qu'il ne faut pas craindre, au prix de l'emploi d'instruments d'optique et de machines plus ou moins précises, suivant les buts recherchés, de tenter de restituer au rayonnement solaire une partie du potentiel thermodynamique qu'il possède près du soleil.

Le rapport général a souligné que l'énergie solaire est dispersée, mais non dégradée au point de vue thermodynamique. Divers orateurs ont demandé, parfois avec passion, que l'on étende les recherches consacrées aux machines (orienteurs, concentrateurs) pour les rendre plus simples et plus accessibles à un emploi généralisé, non seulement pour les fours solaires, mais pour chaque application où le rendement est particulièrement tributaire des gradients de température ou de l'amplitude des cycles thermiques.

D'intéressants dispositifs ont été décrits et il a été discuté en séances des températures limites que l'on pouvait atteindre.

Pour les fours solaires proprement dits, qui utilisent directement l'énergie thermique, il est apparu indiscutablement que leur emploi, en recherche fondamentale, se généralisait. Le four solaire et son succédané, le four à images d'arc intensif, représentent une *technique prototype* et irremplaçable pour les traitements à haute température sans contamination. Ces appareils et leurs applications sont maintenant décrits dans de nombreux congrès se rapportant aux hautes températures.

Les communications présentées à cette Conférence décrivent de nombreux procédés de traitement sans

contamination par les rayons solaires, et ceci à des fins très variées : frittage, fusion, réaction chimique sur front chaud, traitement en cavités, mesures physiques diverses.

Une autre question traitée a été celle de l'agrandissement des machines solaires et de leurs applications industrielles en concurrence avec les fours utilisant d'autres formes d'énergie.

Les perspectives à ce point de vue sont favorables, pour diverses raisons :

1) Le rendement énergétique des fours à concentration de rayonnement (type four à cavité), déjà valable pour les petites unités, croît considérablement avec la puissance mise en jeu. Par exemple, un four solaire de 1 000 kW donne, pour le traitement de substances réfractaires (frittage, fusion) un rendement qui peut atteindre 70 p. 100; il est plus de deux fois plus élevé que celui que l'on obtient avec un appareil de 50 kW;

2) Les opérations ayant lieu sans contamination, le four solaire entre en compétition avec des techniques compliquées conduisant, en général, à des produits chers.

Une autre question examinée a été celle de l'utilité des fours solaires pour les pays sous-développés.

Les grands fours solaires, adaptés aux très hautes températures et capables de fournir des produits spéciaux à des prix compétitifs, ne sont pas, pour l'instant, sauf dans les cas très particuliers, utiles aux pays en voie de développement.

Par contre, comme l'ont souligné certains orateurs, la possibilité de produire économiquement des températures moyennes peut présenter un grand intérêt pour ces pays. A titre d'exemple, la cuisson économique des briques à la chaleur solaire aurait paru impensable il y a quelques années. Aujourd'hui, grâce au développement des réflecteurs légers, on peut envisager une telle opération.

La mise au point d'orienteurs et de concentrateurs économiques n'intéresse d'ailleurs pas seulement la production de températures moyennes ou élevées, mais aussi la production compétitive de force motrice ou de frigories, question capitale dans les zones arides.

La concentration du rayonnement solaire pour obtenir des réactions photochimiques a également fait l'objet d'exposés très intéressants. Les rayonnements convergents apportent une solution nouvelle à l'étude des réactions photochimiques.

Diverses recherches d'un grand intérêt sont à envisager, et il n'est pas exclu que certaines fabrications économiques puissent être entreprises.

## USE OF SOLAR ENERGY FOR HIGH-TEMPERATURE PROCESSING (SOLAR FURNACES)

### *Rapporteur's summation*

As the general report points out, the uses of solar energy described under agenda item III.F involve the employment of optical apparatus giving high concentrations of the energy produced by direct solar radiation. These concentrations may result either in high temperatures through utilization of the total radiation or in intense photochemical effects through the action of concentrated radiation corresponding to only certain wave-length intervals. The two questions will be treated separately.

The production of high temperatures through the action of solar radiation and the use of such temperatures constitute the subject of the great majority of communications submitted under item III.F and of the discussions and statements at meetings. Certain conclusions may be drawn from these various sources.

The general trend of the opinions expressed, which was incidentally echoed in the statements made in connexion with various other agenda items, was that there were no grounds for hesitancy in trying, through the use of optical instruments and precision machinery of various types, to restore to solar radiation part of the thermodynamic potential it possesses close to the sun.

The general report stressed that solar energy was dispersed but not degraded from the thermodynamic point of view. Some speakers asked, sometimes vehemently, for an amplification of research on machines (tracking and concentrating) with a view to simplifying them and making them more accessible for general use, not only in solar furnaces but also for any application in which efficiency is especially dependent on temperature gradients or the amplitude of the thermal cycles.

Some interesting devices were described, and some discussion took place at the meetings on the temperature limits which could be achieved.

As far as solar furnaces in the strict sense are concerned, namely, those which make direct use of thermal energy, it seems indisputably clear that their use in basic research is becoming more widespread. The solar furnace and its substitute, the image furnace with a high-intensity arc, constitute a prototype technique which is invaluable for contamination-free high-temperature heat treatment. These devices and their applications have already been described at a number of congresses dealing with high temperatures.

The communications submitted to this Conference describe a number of procedures for contamination-free treatment by solar radiation for very diverse

purposes such as calcination, fusion, chemical reaction on a hot front, treatment in cavities, and various physical measurements.

A further question dealt with was the building of larger solar furnaces and their use in industry in competition with furnaces using other forms of energy. The prospects in this regard appear favourable for the following reasons:

(1) The energy efficiency of radiation concentration furnaces (cavity-type furnace), which have already proved valuable for small units, increases considerably with the amount of power involved. For example, a solar furnace of a capacity of 1 000 kilowatts will, in the treatment of refractory substances (calcination and fusion), have an efficiency rating of as much as 70 per cent; this is more than twice as great as that obtained with an apparatus of 50 kilowatts.

(2) Since the operations take place without contamination, the solar furnace becomes competitive with complicated techniques which in general cause the items produced to be expensive.

Another matter considered was the usefulness of solar furnaces for the under-developed countries.

Large solar furnaces adapted to very high temperatures and capable of providing special products at competitive prices are not, for the time being, useful to the developing countries except in special cases.

On the other hand, as some speakers pointed out, the possibility of producing medium-range temperatures economically could be of great interest to those countries. For example, an economical method of baking bricks by solar heat would have seemed unthinkable a few years ago, but today the development of light-weight reflectors has made such an operation feasible.

The development of economical tracking and concentrating devices is of interest not only for the production of medium or high temperatures but also for the competitive production of motive power or for refrigeration purposes, a matter of capital importance in the arid zones.

The concentration of solar radiation for the purpose of producing photochemical reactions was also the subject of highly interesting papers. Convergent radiation offers a new solution for the study of photochemical reactions.

Various highly interesting research projects are also under consideration, and it is not impossible that some economical manufacturing processes might be undertaken.

**TRAITEMENT SOUS HAUT VIDE AU FOUR SOLAIRE :  
DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL,  
PRÉPARATION ET ÉTUDE DE NOUVEAUX COMPOSÉS DES TERRES RARES**

*Jean Claude Achard\**

Les éléments des terres rares, dont l'état normal d'ionisation est l'état trivalent, donnent tous un même type d'oxyde : les sesquioxydes de formule  $\text{Ln}_2\text{O}_3$ . Le cérium, le praséodyme et le terbium donnent, en outre, des peroxydes correspondant à la tétravalence, alors que, comme on l'a montré récemment, le samarium, l'euporium et l'ytterbium peuvent former des protoxydes correspondant à la divalence. Cet état de valence a été obtenu par différents procédés :

a) Le premier composé de ce type a été observé en 1933 par Ellinger (1) à la surface d'échantillons métalliques de samarium traités à chaud.

b) Brauer (2), en 1955, obtient des cristaux mixtes  $\text{EuO} - \text{SrO}$  à partir de mélanges  $\text{Eu}_2\text{O}_3 - \text{SrO}$  traités sous vide à haute température. Le rôle de l'oxyde de strontium, qui a même structure cristalline et un paramètre voisin de celui de l'oxyde d'euporium divalent, est de permettre la stabilisation de ce dernier. Les cristaux obtenus ne doivent pas contenir plus de 8 atomes p. 100 d'euporium II.

c) L'utilisation d'un métal réducteur a permis à Eick (3) de préparer, en quantités minimes, les protoxydes d'euporium et de samarium. Le métal utilisé était le lanthane dans le cas de l'oxyde d'euporium et le samarium pour l'oxyde de samarium. Les oxydes étaient préparés par distillation en atmosphère inerte.

d) La première, méthode générale de préparation des protoxydes de samarium, euporium et ytterbium a été décrite par l'auteur en 1957 (4). Le réducteur utilisé était le carbone, les oxydes étaient obtenus par distillation à haute température, sous vide, à partir de mélanges de sesquioxyde et de carbone. Le carbone, lui-même très peu volatil, forme avec l'oxyde une phase gazeuse qui s'élimine du milieu de la réaction, et l'arrêt de la réaction au stade protoxyde est assez marqué pour que l'on puisse préparer ces composés à l'état pur, en quantités notables. La réduction peut cependant, dans certaines conditions, donner des mélanges protoxyde-métal ou du métal.

La réduction par le carbone des sesquioxydes de terre rare conduit, en général, à la formation de

carbures stables, analogues aux carbures alcalino-terreux. Cette formation semble plus difficile dans le cas des éléments à caractère divalent. La présence de phases intermédiaires volatiles, telles que les protoxydes ou les métaux, empêche la formation de carbures quand la réaction est effectuée sous vide et à haute température. Les carbures de samarium et d'ytterbium préparés à la pression ordinaire ont été décrits; par contre, le carbure d'euporium n'a pas été préparé.

La réduction des oxydes de terres rares par le bore se poursuit, en général, jusqu'à la formation d'hexaborures, composés réfractaires et très stables. Dans le cas du samarium, de l'euporium (5) et de l'ytterbium, les paramètres des borures formés sont anormalement élevés, ce qui laisse penser que l'état d'ionisation est l'état divalent ou que les composés formés ne sont qu'en partie ioniques. Une autre série de composés formés au cours de la réduction sont les tétraborures. Les valeurs des paramètres de ces composés décroissent régulièrement quand on passe du lanthane au lutécium, ce qui suppose que les éléments rares y sont à l'état trivalent. Le tétraborure d'euporium n'a pas été décrit.

Le comportement particulier des sesquioxydes des éléments des terres rares à caractère divalent, lors de leur réduction nous a conduit à étudier systématiquement certaines de leurs réactions, en fonction de la température. Les oxydes ont été étudiés seuls ou additionnés de réducteurs tels que le carbone et le bore. Ces éléments forment, en général, des composés stables avec les terres rares, leurs produits d'oxydation sont gazeux ou volatils. Afin de mettre en évidence l'existence et le rôle des phases intermédiaires formées, les réactions ont été effectuées dans des conditions très différentes de température et de pression. Elles ont été faites :

- a) Soit sous haut vide, soit en atmosphère inerte;
- b) Avec des temps de contact brefs ou prolongés;
- c) Avec une température portée soit rapidement à une valeur très élevée, soit au contraire maintenue à une valeur donnée pendant une longue période.

L'énergie solaire paraissant être un moyen pratique de réaliser les différentes conditions précédentes, une première série d'essais portant sur l'oxyde d'euporium a été faite au four solaire, avec un appareillage permettant la réalisation d'un haut vide ou d'une atmosphère inerte.

\* Laboratoire des terres rares du Centre national de la recherche scientifique, Bellevue. Également, Laboratoire de l'énergie solaire du Centre national de la recherche scientifique, Mont-Louis, Pyrénées-Orientales, France.

## Description de l'appareillage

## LE FOUR SOLAIRE (figure 1)

Le miroir parabolique fixe (a) à axe vertical, d'un diamètre de deux mètres, avec une distance focale de 85 cm, en verre argenté, est fixé, dans le laboratoire, au-dessus de la trappe d'accès du rayonnement solaire.

Au-dessous de la trappe (b) se trouve le miroir plan (c) à orientation automatique de 7,5 m<sup>2</sup> de surface, formé de glaces élémentaires de 0,25 m<sup>2</sup>.

Le rayonnement convergent occupe donc tout au long du jour une position invariable.

## L'ENCEINTE DE VIDE ET LE GROUPE DE POMPAGE

## L'enceinte (figures 2 et 3)

La nécessité de déterminer avec précision la position de l'échantillon par rapport au point de convergence du rayonnement solaire impose soit un déplacement de l'échantillon à l'intérieur de l'enceinte, soit le déplacement de l'enceinte elle-même. C'est la deuxième solution qui a été adoptée pour des raisons de simplicité de construction.

La partie transparente de l'enceinte (a) est formée d'une coupole hémisphérique en verre Pyrex de 220 mm de diamètre. Cette coupole est scellée sur une bague en acier (b), refroidie par une circulation d'eau, à l'aide d'une résine organique polymérisable. Les coupoles, solidaires de leur socle, peuvent ainsi être échangées rapidement lorsqu'elles ont été

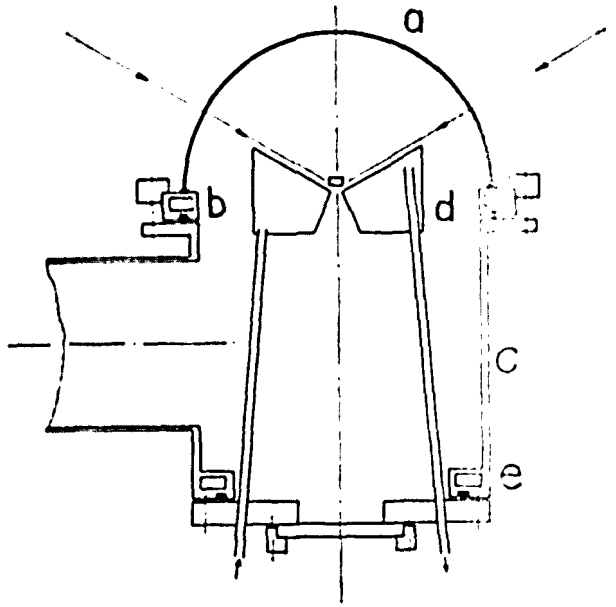


Figure 2. Schéma de l'enceinte de vide

obscurcies par les dépôts formés par volatilisation au cours des traitements.

Les socles de coupoles sont fixés par l'intermédiaire d'un joint torique à la partie supérieure d'une cuve cylindrique en acier de 200 mm de diamètre. La partie inférieure de cette cuve reçoit les différentes platines porte-échantillon :

a) Une platine (d) comportant en son centre une glace de visée pyrométrique, et un porte-échantillon en cuivre, refroidi par circulation d'eau, qui épouse la forme du rayonnement solaire et permet de condenser une partie des produits volatils;

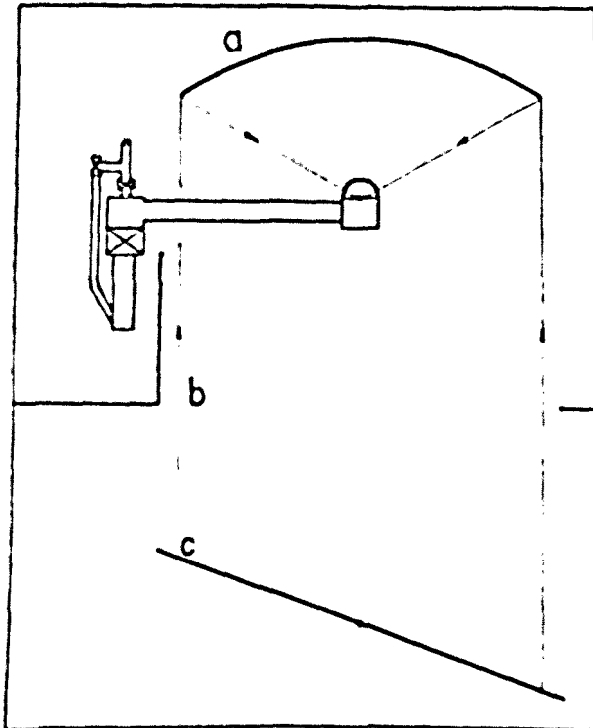


Figure 1. Schéma du four solaire

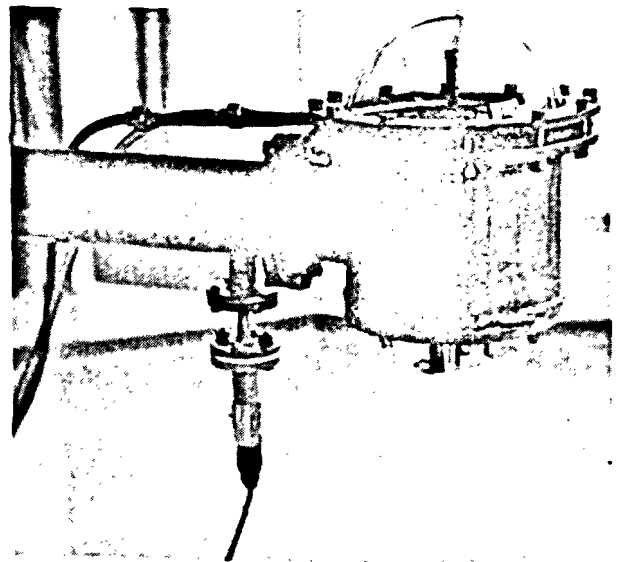


Figure 3. Enceinte de vide et canalisation-support



b) Une platine comportant un porte-échantillon excentré du même type entraîné par un axe traversant l'enceinte de vide; elle permet de porter successivement au foyer quatre échantillons et comporte aussi une glace de visée pyrométrique;

c) Une platine comportant un support en cuivre, refroidi par circulation d'eau; elle sert de support aux creusets pour les réactions en creuset, à température moyenne ou en creuset formant corps noir.

Chacune de ces platines et des porte-échantillons peuvent être fixés à la partie inférieure (e) de la cuve par l'intermédiaire d'un joint torique, dont le logement est refroidi par circulation d'eau.

La canalisation de haut vide, d'un fort diamètre (120 mm) en raison de sa longueur (1 m), est fixée à la sortie latérale de la cuve par l'intermédiaire d'une bride et d'un joint torique. Le serrage des brides amène au contact les parties métalliques du raccord; la canalisation peut ainsi servir de support à l'enceinte de vide sans que cela nuise à l'étanchéité du montage.

#### Groupe de pompage (figures 4 et 5)

##### Vide secondaire

La canalisation (a) qui supporte l'enceinte de vide est fixée au-dessus de la vanne-écran (b) de la pompe à diffusion d'huile (c). La vanne-écran est reliée par la canalisation de by-pass (d), au vide primaire. Elle comporte aussi une arrivée d'argon purifié et trois manomètres permettant de couvrir la plage 750 à  $10^{-6}$  Torr.

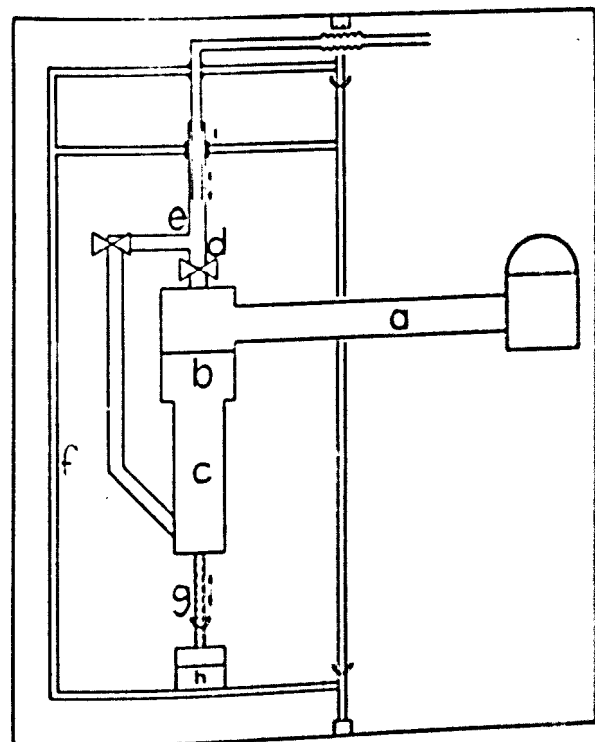


Figure 4. Schéma d'ensemble de l'appareillage de vide

La pompe à diffusion d'huile faite sous la vanne-écran est reliée à la canalisation de vide primaire (a).

L'enceinte de vide, la canalisation de vide secondaire, la pompe à vide secondaire et la canalisation de by-pass sont solidaires et se déplacent d'un seul bloc. Pour cela, la pompe secondaire est maintenue en place à l'intérieur d'un châssis métallique (f). Elle est supportée par une vis sans fin (g) actionnée par un moteur électrique (h) et guidée par la partie inférieure de la canalisation de vide primaire qui lui est solidaire (i) et coulisse et tourne par l'intermédiaire d'un palier en bronze. L'ensemble peut donc effectuer un mouvement de translation vertical qui permet de régler la hauteur de l'échantillon, et un mouvement de rotation autour d'un axe vertical qui permet de placer l'échantillon dans l'axe du rayonnement et d'amener l'enceinte de vide en dehors de la trappe d'accès du rayonnement pour la mise en place de l'échantillon. De plus, le châssis support pivote autour de l'un de ses montants verticaux pour compléter les possibilités de réglages dans un plan horizontal.

##### Vide primaire

Un groupe de deux pompes primaires à palettes est disposé au voisinage de la pompe secondaire. La partie supérieure de la canalisation de vide primaire solidaire du châssis coulisse et tourne à l'intérieur de la partie inférieure de la canalisation solidaire de la pompe secondaire. L'étanchéité est assurée par un ensemble de joints industriels (k) pour arbre tournant. La liaison entre la partie de la canalisation de vide primaire solidaire du châssis et la pompe se fait par des membranes souples et une canalisation rigide.

Le montage décrit correspond à un nombre très limité de joints fixes dans la partie du vide secondaire. L'ensemble des joints nécessaires à la réalisation du mouvement de l'échantillon se trouve reporté dans la partie du vide primaire. Le dégazage et les défauts d'étanchéité sont, dans cette partie, beaucoup moins néfastes puisque le pompage peut y être assuré en continu et qu'ils n'intervient pas sur le vide régnant dans l'enceinte du travail.

#### Comportement du sesquioxyde d'europium à haute température et sous haut vide figure 6

Des pastilles comprimées de sesquioxyde d'europium, placées sur une platine refroidie par circulation d'eau, afin d'éviter toute réaction entre l'échantillon et le support métallique, sont portées à une température supérieure à 2500°. L'échantillon étant placé au point de convergence du rayonnement solaire. La pression dans l'enceinte est maintenue au-dessous de  $10^{-6}$  Torr. Dans ces conditions, la fusion et la distillation de l'oxyde interviennent très rapidement.

Le distillat recueilli sur la surface et sur les parties froides de la platine est brun rouge, ce qui pourrait indiquer une réaction au niveau pastille du sesquioxyde. Cependant, les radiations en lignes  $\alpha$  du thorium des rayons X, augmentent de poids d'un

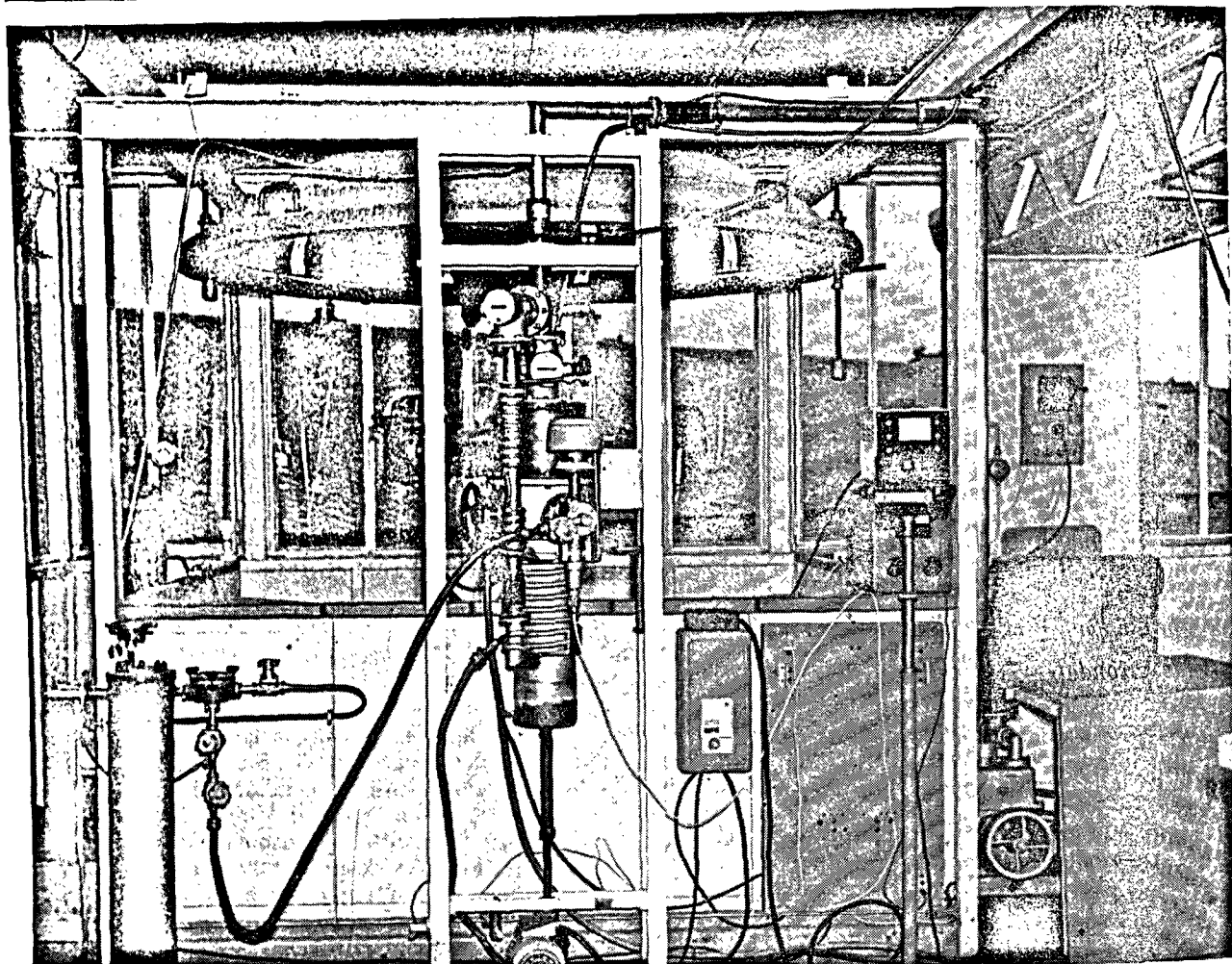


Figure 5. Ensemble de l'appareillage de vide

échantillon lors de sa calcination sous oxygène) sont trop peu sensibles et n'ont pas permis de mettre en évidence une réduction quelconque du sesquioxyde.

#### Réduction du sesquioxyde d'euprimum par le carbone

Les expériences précédentes ont été reprises en ajoutant au sesquioxyde des quantités variables de graphite en poudre. Les deux constituants intimement mélangés sont comprimés à la presse hydraulique pour assurer un bon contact.

#### Chauffage rapide du sesquioxyde d'euprimum en présence de carbone

Les mélanges carbone-oxyde sont portés rapidement à une température supérieure à  $2500^{\circ}$  sous haut vide. Là encore, le sesquioxyde distille sans que l'on puisse mettre en évidence la réduction. La vaporisation se poursuit jusqu'à ce qu'il ne reste plus que le graphite.

#### Chauffage progressif en atmosphère inerte du sesquioxyde d'euprimum en présence de carbone

L'utilisation d'une atmosphère inerte est destinée à ralentir la volatilisation du sesquioxyde. La pression dans l'enceinte est maintenue à 500 Torr.

Les expériences sont faites dans un creuset de tantale; celui-ci est placé à l'intérieur d'un creuset cylindrique en carbone en évitant le contact tantale-carbone. Le creuset de carbone reçoit le rayonnement solaire par sa surface latérale. Dans le fond du creuset de carbone est ménagée une cavité qui permet d'évaluer les températures à l'aide de visées pyrométriques.

a) Le sesquioxyde, pesé après calcination, est mélangé avec la proportion choisie de poudre de graphite pour spectrographie et comprimé à la presse hydraulique sans addition de liant. La pastille obtenue est placée sur la tranche dans le creuset de tantale afin de limiter la contamination.

b) Le mélange est tout d'abord dégazé sous vide entre  $900$  et  $1000^{\circ}$ , puis l'argon purifié est introduit dans l'enceinte, la pression étant maintenue à 500 Torr.

c) Le produit est maintenu à la température de réaction voisine de 1 300 °C pendant une ou deux heures, puis porté à 1 700° pendant une à trois minutes afin d'augmenter la compacité des produits obtenus.

Les produits de la réaction sont soumis à l'analyse par diffraction X (diagrammes de Debye). Un autre échantillon est calciné à 900° sous un lent courant d'oxygène purifié. Cette calcination permet, d'une part, le dosage du carbone total contenu dans l'échantillon par dosage gravimétrique de l'anhydride carbonique formé, d'autre part, la détermination du degré d'oxydation de l'euporium, par la mesure de l'augmentation de poids de l'échantillon lors de sa transformation en sesquioxyde. Le carbone libre et la quantité d'euporium présent dans l'échantillon sont dosés par dissolution de l'échantillon en milieu acide, pesée du carbone résiduel, et précipitation dans le filtrat de l'oxalate d'euporium, qui est calciné à l'air à 900° et donne le sesquioxyde.

Le rapport atomique C/Eu dans le mélange initial varie entre 0,15 et 0,6. Lorsqu'il est compris entre 0,15 et 0,4, le sesquioxyde n'est que partiellement

réduit, et est de teinte rouge brique. La proportion atomique O/Eu est, dans les produits obtenus, comprise entre 1,4 et 1,04; elle décroît lorsque la proportion de carbone dans le mélange initial augmente. Il ne reste pratiquement pas de carbone dans les produits de réduction. Les spectres de diffraction sont formés des raies du protoxyde Eu O, d'autres raies, que nous attribuons à une nouvelle phase bien que nous n'ayons pu encore en préciser la nature, et aussi, dans certains essais, des raies du sesquioxyde (forme B de Goldschmidt (7)). Le maximum d'intensité des raies de la phase inconnue correspondrait à des rapports atomiques O/Eu voisins de 1,3.

Lorsque le rapport atomique C/Eu est compris entre 0,4 et 0,6, les échantillons obtenus sont rouge sombre, et les diagrammes de diffraction montrent que le constituant principal est le protoxyde Eu O. Pour un rapport atomique C/Eu = 0,6, rapport correspondant à la réaction  $\text{Eu}_2\text{O}_3 + \text{C} \rightarrow \text{C O} + 2\text{Eu O}$ , le diagramme de diffraction contient encore quelques raies étrangères à celles du protoxyde et le rapport atomique O/Eu est encore légèrement

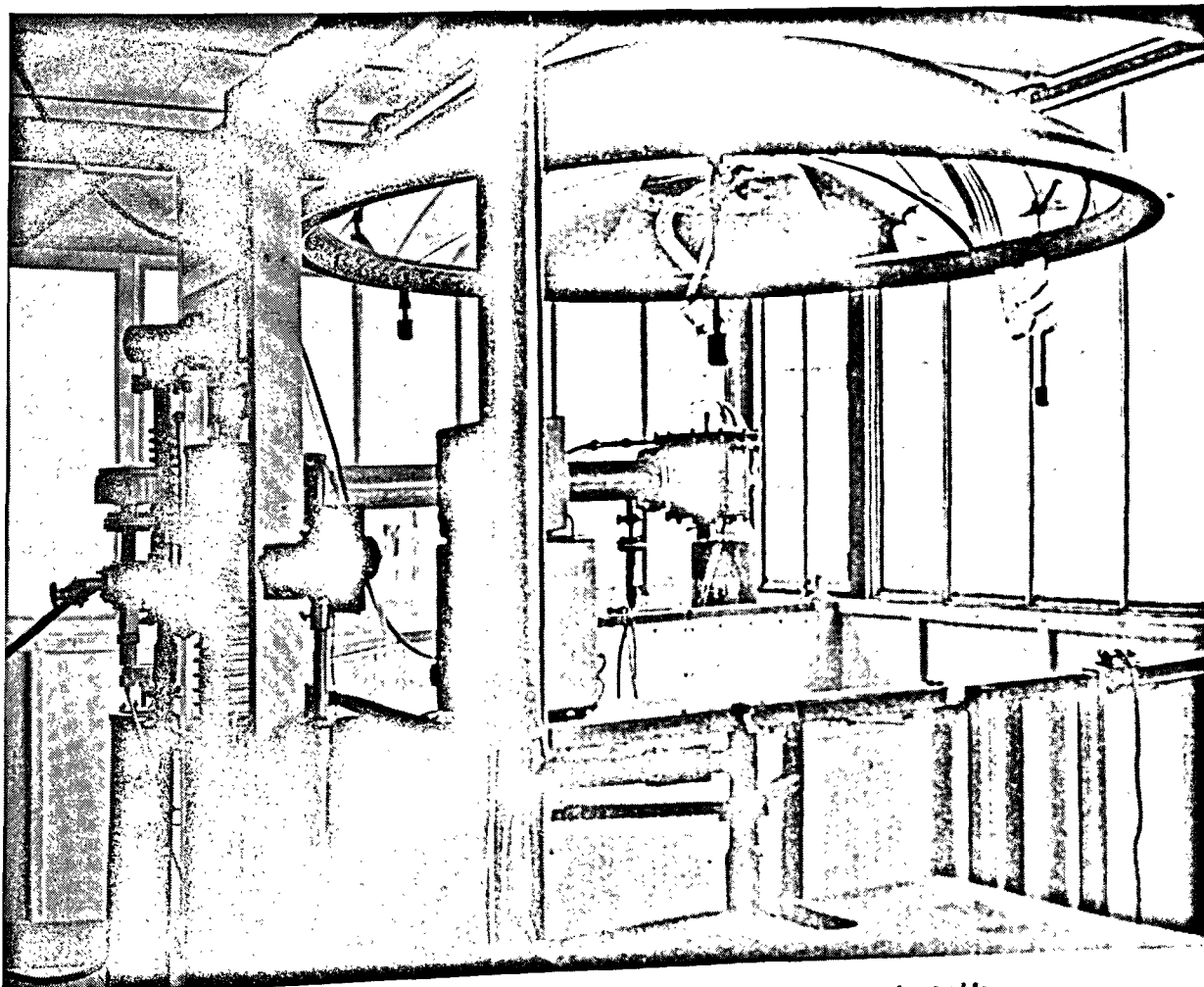


Figure 6. Dispositif de traitement à haute température et sous haut vide

supérieur à 1. Pour des rapports C/Eu égaux à 0,6, on obtient un produit pour lequel le rapport atomique O/Eu est égal à  $1 \pm 0,02$ . Ce produit ne contient pas de carbone, et les raies du diagramme de diffraction sont celles du protoxyde Eu O. Le composé appartient au système cubique faces centrées, son paramètre est de 5,14 Å. Le rayon d'ion pour Eu que l'on peut déduire de la structure est celui de l'ion divalent. L'excès de carbone nécessaire à la préparation du protoxyde pur peut être utilisé, soit pour une carburation limitée du creuset de tantale dans la partie en contact, soit, plutôt, par la formation d'une faible quantité d'europium métallique susceptible de se former et de se vaporiser au cours de la réaction.

Lorsque le rapport C/Eu est supérieur à 0,6, les produits formés sont instables et se décomposent rapidement au contact de l'air. On n'a pu mettre en évidence la formation de carbures.

La méthode décrite permet la préparation de quantités importantes de protoxyde d'europium. Celui-ci se montre un produit intermédiaire stable de la réaction de réduction du sesquioxyde qui, nous l'avons montré (1), peut conduire au métal. La formation de carbure n'a pu être mise en évidence. Sans doute nécessite-t-elle l'intervention d'une pression élevée limitant la vaporisation du protoxyde et du métal.

Le protoxyde a été fondu. Il est rouge sombre, relativement stable à l'air sous cette forme. Il se détruit lentement par action de l'eau. Sa densité est voisine de 7,7 g/cm<sup>3</sup> (densité calculée d'après la structure 8,14 g/cm<sup>3</sup>). Sous vide, le protoxyde distille sans décomposition. On obtient, comme dans les expériences de réduction effectuées sous vide, des condensats bleus ou rouges selon la température de condensation, mais de structure cristalline et de paramètre identiques.

### Réduction du sesquioxyde d'europium par le bore

*Le mode opératoire est analogue à celui utilisé pour les réductions par le carbone*

Le bore élément est utilisé sous forme pulvérulente; il est mélangé à sec avec le sesquioxyde d'europium et le mélange est comprimé sans addition de liant, à la presse hydraulique.

*Chauffage rapide, à haute température et sous vide du sesquioxyde d'europium en présence de bore*

Un mélange intime de sesquioxyde et de bore, dans un rapport atomique B/Eu = 7, est porté brutalement à une température supérieure à 2 500 °C. La réaction est instantanée et conduit à la formation d'hexaborure d'europium.

*Chauffage sous haut vide à 1 500-1 600 °C*

Le bore, dans ces conditions, réagit très rapidement, pour former l'hexaborure. Alors même que le rapport atomique B/Eu varie dans le mélange initial

entre 2 et 13, le seul produit fixe est l'hexaborure, le rapport atomique B/Eu correspondant à la réaction  $\text{Eu}_2\text{O}_3 + 14\text{B} \rightarrow \text{Eu}_2\text{B}_6 + \text{B}_2\text{O}_3$  est égal à 7. Lorsque, dans le mélange utilisé, le rapport B/Eu est inférieur à 7, l'on peut admettre la volatilisation de métal ou d'oxyde, lorsqu'il est supérieur, celle du bore.

*Chauffage progressif en atmosphère inerte du sesquioxyde d'europium en présence de bore*

Les pastilles comprimées, placées dans un creuset de tantale lui-même contenu dans un creuset de carbone recevant le rayonnement solaire par sa surface latérale, sont tout d'abord dégazées sous vide à 900°. Elles sont ensuite chauffées pendant un certain temps, à des températures comprises entre 1 200 et 1 500 °C, en atmosphère inerte, sous une pression de 500 Torr.

Lorsque le rapport atomique B/Eu est, dans le mélange initial, compris entre 0,3 et 0,6 et que la réaction est effectuée à 1 200-1 300°, le produit formé est en majeure partie le protoxyde d'europium. Il est à peu près pur lorsque le rapport est voisin de 1/3, valeur correspondant à la réaction stœchiométrique  $3\text{Eu}_2\text{O}_3 + 2\text{B} \rightarrow 6\text{EuO} + \text{B}_2\text{O}_3$ .

Lorsque la proportion de bore est supérieure, les diagrammes de diffraction laissent apparaître un système de raies, non encore identifié, à côté de celui du protoxyde.

Lorsque le rapport atomique B/Eu est supérieur à 0,6 et que la température est maintenue au voisinage de 1 300°, il y a formation d'une ou plusieurs phases inconnues, certains des produits formés sont instables et se décomposent aussitôt à l'air atmosphérique. Les différentes phases n'ont pu encore être identifiées.

Si la température est portée au-dessus de 1 400 °C, on note l'apparition de l'hexaborure d'europium, qui, si le chauffage est prolongé, devient le seul composé dont les raies apparaissent sur les diagrammes.

L'hexaborure d'europium formé dans ces expériences appartient au système cubique simple; son paramètre est de 4,18 Å. Il est très stable et réfractaire et n'est pas détruit, même après un chauffage prolongé à haute température et sous haut vide.

### Propriétés particulières des éléments des terres rares à caractère divalent

Ces propriétés ont été mises en évidence par cette première série d'expériences portant sur l'oxyde d'europium.

Le protoxyde d'europium est un produit intermédiaire de la réduction du sesquioxyde, lorsque les conditions de concentration, de température et de pression sont convenables; la totalité du sesquioxyde peut être transformée en protoxyde, la réaction ayant lieu en phase solide. Le carbone et le bore se comportent d'une manière analogue: ils s'éli-

minent du mélange réactionnel par volatilisation sous forme d'oxydes.

Le carbure d'euporium n'a pu être préparé ni sous vide, ni à la pression atmosphérique, alors que l'hexaborure d'euporium se forme aisément dans les conditions précédentes.

Le tétraborure d'euporium n'apparaît pas dans les produits de réduction. Ceux-ci paraissent cepen-

dant comporter plusieurs phases cristallines qui n'ont pu être caractérisées et dont certaines sont très instables et se détruisent très rapidement à l'air atmosphérique.

La réduction des oxydes de terres rares n'ayant pas de caractère divalent donne seulement les carbures quand elle est réalisée par le carbone, les tétra et hexaborures quand elle est réalisée par le bore.

### Références

1. Ellinger et Zachariasen, *J. Amer. Chem. Soc.*, 75, 5650, 1953.
2. Braver, Muller et Zapp, *Z. anorg. allg. Chem.*, 276, 40, 1955.
3. Eick, Baenziger et Eyring, *J. Amer. Chem. Soc.*, 78, 5147, 1956.
4. Achard, *Comptes rendus*, 244, 3059, 1957; 245, 1064, 1958.
5. Felten, Binder et Post, *J. Amer. Chem. Soc.*, 80, 3479, 1958.
6. Chaillou et Olette, *Le Vide*, 71, 383, 1957.
7. Curtis et Thorp, *J. Amer. Ceram. Soc.*, 42, 151, 1959.

### Résumé

L'étude du comportement du sesquioxyde d'euporium, à haute température et sous vide, et de la réduction en phase solide de ce composé pour des réducteurs tels que le carbone et le bore, est réalisée au four solaire.

Le four solaire, d'une puissance voisine de deux kilowatts, comporte un miroir parabolique fixe de deux mètres de diamètre et de 85 cm de distance focale. Ce dernier reçoit, suivant une direction verticale, le rayonnement solaire réfléchi par un miroir plan à orientation automatique.

L'enceinte de vide est en acier, sauf la partie soumise au rayonnement convergent, qui est en verre Pyrex. Elle est reliée rigidement à la pompe secondaire, placée en dehors des rayons solaires. La pompe secondaire et l'enceinte à vide sont mobiles, ce qui permet de régler les positions relatives de l'échantillon et du foyer, ainsi que la mise en place du produit dans l'enceinte. Le groupe des pompes primaires est fixe, le déplacement relatif des deux parties (vide secondaire et vide primaire) est réalisé grâce à des joints spéciaux situés sur la canalisation de vide primaire.

#### Comportement du sesquioxyde à haute température et sous haut vide

Le sesquioxyde distille sans que puisse être mise en évidence la réaction  $\text{Eu}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Eu O} + \frac{1}{2}\text{O}_2$  que paraît indiquer la coloration rouge des distillats.

#### Réduction du sesquioxyde d'euporium par le carbone

La réduction est effectuée en phase solide à partir de mélanges intimes d'oxyde et de carbone.

Lorsque ces mélanges sont portés très rapidement

à haute température, sous haut vide, le sesquioxyde distille sous réduction notable.

Si les réactions sont effectuées en atmosphère inerte (argon, pression maintenue à 500 Torr), la réduction a lieu pour des températures de l'ordre de 1 300 °C.

Pour les mélanges dont le rapport atomique C/Eu est compris entre 0,15 et 0,4, le sesquioxyde n'est que partiellement réduit, et est de teinte rouge brique. La proportion atomique O/Eu est, dans les produits obtenus, comprise entre 1,4 et 1,04; elle décroît lorsque la proportion de carbone dans le mélange initial augmente. Les spectres de diffraction sont formés des raies du protoxyde Eu O, d'autres raies que nous attribuons à une nouvelle phase, bien que nous n'ayons pu encore en préciser la nature, et aussi, dans certains essais, des raies du sesquioxyde.

Lorsque le rapport atomique C/Eu est compris entre 0,4 et 0,6, les échantillons obtenus sont rouge sombre. Les diagrammes de diffraction montrent que le constituant principal est le protoxyde Eu O. Celui-ci est obtenu pur lorsque le rapport C/Eu est de 0,6, légèrement supérieur à la quantité stœchiométrique de la réaction  $\text{Eu}_2\text{O}_3 + \text{C} \rightarrow 2\text{Eu O} + \text{CO}$ . Dans ce dernier cas, le rapport O/Eu est égal à  $1 + 0,02$ .

Lorsque le rapport atomique C/Eu est supérieur à 0,6, les produits formés sont très instables et se décomposent très rapidement au contact de l'air. On n'a pu mettre en évidence la formation de carbures.

Le protoxyde d'euporium est rouge sombre, relativement stable à l'air. Sa densité est voisine de 7,7 g/cm<sup>3</sup>. Sous haut vide, il distille sans décomposition, sa structure cristalline demeure identique,

mais selon les conditions de condensation, les distillats sont bleus ou rouges.

#### *Réduction du sesquioxyde par le bore*

Lorsque les mélanges oxyde-bore sont portés très rapidement à température élevée, sous haut vide, la réduction est très rapide et conduit à l'hexaborure Eu B<sub>6</sub>.

Lorsque la durée de l'opération est augmentée et la température maintenue à environ 1 500-1 600°, le seul produit de la réaction effectuée sous vide est encore l'hexaborure, bien que le rapport atomique B/Eu varie dans le mélange initial entre 2 et 13, le rapport 7 correspondant à la réaction  $\text{Eu}_2\text{O}_3 + 14 \text{ B} \rightarrow 2 \text{ Eu B}_6 + \text{B}_2\text{O}_3$ .

Lorsque les réactions sont effectuées en atmosphère inerte au-dessous de 1 400°, l'un des produits de la réaction est le protoxyde.

Lorsque le rapport atomique B/Eu est dans le mélange initial compris entre 0,3 et 0,6, le constituant principal est le protoxyde. Il est pur lorsque le rapport est voisin de 1/3, valeur correspondant à la réaction  $3\text{Eu}_2\text{O}_3 + 2 \text{ B} \rightarrow 6 \text{ Eu O} + \text{B}_2\text{O}_3$ .

Lorsque la proportion est supérieure, les diagrammes de diffraction laissent apparaître un système de raies, non encore identifiées, à côté de celui du protoxyde.

Lorsque le rapport est supérieur à 0,6, il y a formation de plusieurs phases inconnues. Certains des produits formés sont instables et se décomposent à l'air.

Si la température s'élève au-dessus de 1 400°, on note l'apparition de l'hexaborure qui, pour un chauffage prolongé, devient le seul composé dont les raies apparaissent sur les diagrammes de diffraction.

L'hexaborure d'euporium appartient au système cubique simple, et son paramètre est de 4,18 Å. Il est très stable, réfractaire, et n'est pas détruit, même après un chauffage prolongé à haute température et sous haut vide.

#### *Propriétés particulières*

Le protoxyde d'euporium est un produit intermédiaire de la réduction du sesquioxyde par le bore et le carbone. L'euporium ne donne, dans les conditions de température et de pression réalisées, aucun composé stable avec le carbone. Avec le bore, au contraire, l'euporium forme très facilement un hexaborure qui est très stable. On n'a pu préparer du tétraborure d'euporium. Le système B-Eu est, dans les conditions expérimentales, beaucoup plus riche en composés que le système C-O-Eu. Peut-être renferme-t-il des composés contenant simultanément du bore et de l'oxygène.

## HIGH VACUUM TREATMENT IN THE SOLAR FURNACE: EXPERIMENTAL SET-UP, PREPARATION AND STUDY OF NEW RARE-EARTH COMPOUNDS

### *Summary*

The behaviour of europium sesquioxide at high temperature *in vacuo*, and the reduction of this compound in the solid phase by reducing agents such as carbon and boron, have been studied in the solar furnace.

The power of the solar furnace used was about two kilowatts. It had a fixed parabolic mirror, two metres in diameter and with a focal length of 85 cm, receiving the solar radiation reflected vertically on to it by an automatically oriented plane mirror.

The vacuum chamber was of steel, except for the portion subjected to the convergent radiation, which was of Pyrex glass. It was rigidly connected to the secondary pump, located outside the path of the solar rays. The secondary pump and vacuum chamber were both movable, permitting adjustment of the relative positions of specimen and focus, and the positioning of the product in the chamber. The group of primary pumps was fixed, and the mutual displacement of the two parts — secondary vacuum and primary vacuum — was accomplished by means of special joints located in the primary vacuum ducts.

#### *Behaviour of europium sesquioxide at high temperature under high vacuum*

The sesquioxide distills without definite proof of the reaction  $\text{Eu}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{EuO} + \frac{1}{2} \text{O}_2$  which the red colour of the distillates appeared to indicate.

#### *Reduction of europium sesquioxide by carbon*

The reduction was accomplished in the solid phase, using intimate mixtures of the oxide with carbon.

When these mixtures were brought very rapidly to a high temperature under high vacuum, the sesquioxide distilled without appreciable reduction.

When the reactions were run in an inert atmosphere (argon, with the pressure held at 0.6 mm Hg), the reduction took place at temperatures of the order of 1300°C.

For mixtures with a C/Eu atomic ratio between 0.15 and 0.4, the reduction of the sesquioxide was only partial; its color was brick red. The O/Eu atomic ratio ranged from 1.4 to 1.04 in the products obtained. It decreased with increasing proportion of carbon in the initial mixture. The diffraction

spectra consisted of lines of the protoxide  $\text{EuO}$ , of other lines attributed to a new phase, although we have as yet been unable to determine its nature, and also, in some experiments, of sesquioxide lines.

At C/Eu atomic ratios between 0.4 and 0.6, the specimens obtained were dark red. The diffraction spectra indicated that the principal component was the protoxide  $\text{EuO}$ . The pure protoxide was obtained at the C/Eu ratio 0.6, slightly above the stoichiometric ratio of the reaction  $\text{Eu}_2\text{O}_3 + \text{C} \rightarrow 2\text{EuO} + \text{CO}$ . In the latter case, the ratio O/Eu was equal to  $1 + 0.02$ .

At C/Eu atomic ratios higher than 0.6, the products formed were very unstable and decomposed very rapidly in contact with air. No carbide formation could be noted.

Europium protoxide is dark red and is relatively stable in air. Its density is about  $7.7 \text{ g/cm}^3$ . It distilled without decomposition in a high vacuum, and its crystalline structure remained unchanged, but the distillates were blue or red, according to the conditions of condensation.

#### *Reaction of europium sesquioxide by boron*

When the oxide-boron mixtures were very rapidly heated to a high temperature under a high vacuum, the reduction was very rapid, leading to the hexaboride  $2\text{EuB}_6$ .

When the duration of the heating was prolonged and the temperature held at about  $1500\text{--}1600^\circ\text{C}$ , the only product of the reaction *in vacuo* was again the hexaboride, although the B/Eu atomic ratio of the initial mixture was varied between 2 and 13. The ratio 7 corresponds to the reaction  $\text{Eu}_2\text{O}_3 + 14\text{B} \rightarrow 2\text{EuB}_6 + \text{B}_2\text{O}_3$ .

When the reactions were run in an inert atmosphere below  $1400^\circ\text{C}$ , one of the reaction products was the protoxide.

At B/Eu atomic ratios in the initial mixture between 0.3 and 0.6, the main component was the protoxide. It was pure at a ratio of about  $1/3$ , corresponding to the reaction  $3\text{Eu}_2\text{O}_3 + 2\text{B} \rightarrow 6\text{EuO} + \text{B}_2\text{O}_3$ .

At higher ratios, the diffraction spectra showed a system of unidentified lines alongside that of the protoxide.

At ratios over 0.6, several unknown phases were formed. Some of the products so formed were unstable and decomposed in air.

At temperatures over  $1400^\circ\text{C}$ , the appearance of the hexaboride was noted. On prolonged heating, this became the only compound with lines appearing on the diffraction spectrum.

Europium hexaboride belongs to the cubic system, with a parameter of  $4.18 \text{ \AA}$ . It is very stable and refractory. It is not destroyed even by prolonged heating at high temperatures under high vacuum.

#### *Specific properties*

Europium protoxide is an intermediate product of the reduction of the sesquioxide by boron or carbon. Under the temperature and pressure conditions of these experiments, europium forms no stable compound with carbon. With boron, on the other hand, it does very readily form a hexaboride, which is very stable. Europium tetraboride could not be prepared. Under the experimental conditions, the system B-O-Eu has many more compounds than the system C-O-Eu. It may perhaps also include compounds of europium with both boron and oxygen in the same molecule.

## IMAGE QUALITY AND USE OF THE UNITED STATES ARMY QUARTERMASTER SOLAR FURNACE

*Eugene S. Cotton, William P. Lynch, Walter Zagieboylo and John M. Davies\**

The U.S. Army Quartermaster Corps has been concerned for a number of years with the need for protective materials which may be exposed to intense thermal radiation for short periods of time. To facilitate these studies (1), a solar furnace was completed in September 1958 which produces an image approximately 10 cm in diameter. Since that time, the device, which is the largest in the United States, has been continuously employed in experimental research on the behavior of various materials and systems. This furnace is shown in figure 1.

We shall describe the general features of the solar furnace, its unique optical characteristics, its performance as an imaging device, and the types of research for which it is suited. It is hoped that our experience will aid in the planning for other large concentrating devices of equal or lesser precision. The criteria for performance of solar furnaces must be defined in terms of their eventual use; however, in all cases the purpose is to produce a solar image, or a volume of convergence, with as high a precision as is consistent with cost and effort. It is with this aim that we present the results of our work to those concerned with the utilization of the earth's many sources of energy.

### Principal features

The Quartermaster solar furnace utilizes a two-mirror optical system; it consists of a movable array of flat mirror segments, called the heliostat, which reflects solar radiation horizontally, and a fixed array of concave mirror segments, called the concentrator, which receives the reflected radiation and forms the convergent beam. These two components are located about 30 meters apart on a meridian, so that the reflected solar radiation from the heliostat is always directed toward the south. Between them is a framework containing vanes which can be rotated around horizontal axes. These vanes regulate the fraction of the reflected solar radiation which passes from the heliostat to the concentrator. This intervening device is called the attenuator.

The radiation which is focused by each mirror segment on the concentrator produces a solar image at a distance of 10.7 meters. By properly aligning the individual segments, a composite solar image can be formed at a point on the system axis

inside the test chamber, which is a working enclosure and control center for the entire system. Figure 2 shows the radiation paths between the four major components.

The heliostat is composed of 356 segments of flat glass, each 62 cm by 62 cm, and 0.635 cm thick, mounted on a movable steel framework, 12.2 meters wide and 11 meters high. The glass used is water-white plate, manufactured by the Pittsburgh Plate Glass Company. The reflecting material is silver, chemically deposited on the rear surface; protection from the atmosphere is provided by copper-plate, mirror-backing paint and pressure-sensitive aluminum tape. The mirror segments shown in figure 3 are held on the framework by stainless steel studs which pass through three holes in the segment, on a centered circle. On each stud is a self-locking stainless steel nut and washer, which press the mirror against a spring on the back. Mirror alignment can thus be accomplished from the front; the loaded springs maintain the alignment for long periods of time. The objective during heliostat alignment is to bring the various segments into planes which are mutually parallel. It is not necessary that they be in the same plane, and, in fact, we have offset the stud lengths on alternate mirrors so that the structure has gaps between segments to provide some relief from wind pressure. A negligible amount of radiation is lost because of this offset and the subsequent shadowing.

The heliostat rotates about horizontal and vertical axes in order to reflect solar radiation along the concentrator optical axis without deviation in time. Automatic servomechanism control of this motion is produced by electrical drive systems from error signals developed in a stationary photoelectric "sun finder" viewing the reflected beam. Theoretical studies based on component characteristics and laboratory simulation with these components verified the stability and satisfactory response of the system before actual use. Manual control of the electric drive motors for both tracking and slewing is also possible.

Reflected radiation from the heliostat must pass through the attenuator, which contains 17 rows of rotating blades. The blade angle is controlled by the operator and varies from 45° to 90° from the vertical for complete to minimum attenuation. Automatic safety circuits are co-ordinated with the attenuator drive circuit, so that any failure or dangerous condition removes power from the driving

\* Pioneering Research Division, United States Army Quartermaster Research and Engineering Center, Natick, Massachusetts.



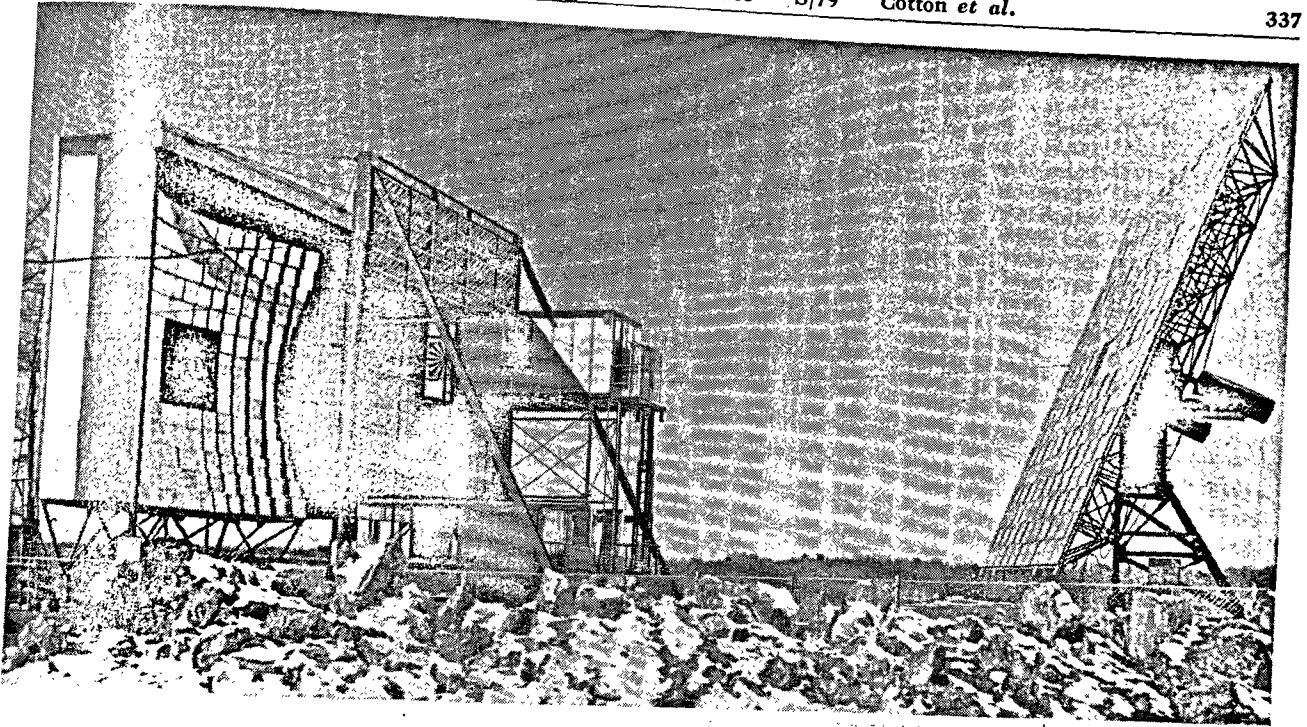


Figure 1. General view of Quartermaster solar furnace

clutch and permits the blades to close under gravity to the 45°, or overlapping, position.

The radiation which passes through the attenuator illuminates the concentrator surface, shown in figure 4. This array is composed of 180 concave mirror segments, one-half of which are 62 cm by 62 cm, with the remainder measuring 64 cm by 66 cm. The segments are mounted on a spherical framework of square outline, about 9.1 meters on each side, which stands about 3 meters from the ground level. Each mirror segment is a portion of a spherical surface having a radius of curvature of 21.4 meters. The mirrors now in use are made of plate glass 0.635 cm in thickness; they were slumped to achieve the proper curvature and then vacuum-coated with evaporated aluminum and silicon-monoxide on the first surface (concave).

Each mirror is aligned so that it forms a solar image at the same point on the optical axis of the array, 10.7 meters from the center of the concentrator, which is also the center of curvature for the surface formed by the centers of the mirror segments. The image position occurs inside the test chamber, where shutters are employed to control its use, as shown in figure 5. A water-cooled shutter protects the image area before exposures are desired. When it has been withdrawn, fast-acting aluminum shutters alternately expose and cover the sample to yield "rectangular" pulses, after which the water-cooled shutter again covers the entire area. The test chamber also houses the heliostat and attenuator controls, monitoring and measuring instruments, and limited laboratory facilities.

### Optical design

The focal length of the concentrator surface was fixed when the image diameter was chosen to suit our applications. The average angle subtended by the solar disk is  $\alpha = .0093$  radians, so that the focal length is :

$$f = d/\alpha \\ = \frac{9.9 \text{ cm}}{.0093} = 10.7 \text{ meters}$$

where  $d$  is the image diameter. Also, our requirements for useful flux density in the image gave a minimum concentrating area of about 50 square meters, making reasonable assumptions regarding performance. This area is more than double that of the world's largest telescope, so that a segmented surface was mandatory if any degree of precision was desired. Segmented surfaces composed of flat pieces were employed in other solar furnaces (2 and 3), but for the large number of segments needed here, this seemed impractical. Also, one had either to bend these flat pieces (2), or accept light losses due to the divergence from a parallel beam (3).

We decided to use larger segments which could be pre-formed into concave mirrors and function as parts of an over-all array. Each of them would then serve to produce a separate solar image, and if properly oriented, these images would form a composite image. One possible approach was to make each segment a portion of a paraboloidal surface, with radii of curvature which varied according to the radial distance from the system axis. An approximation

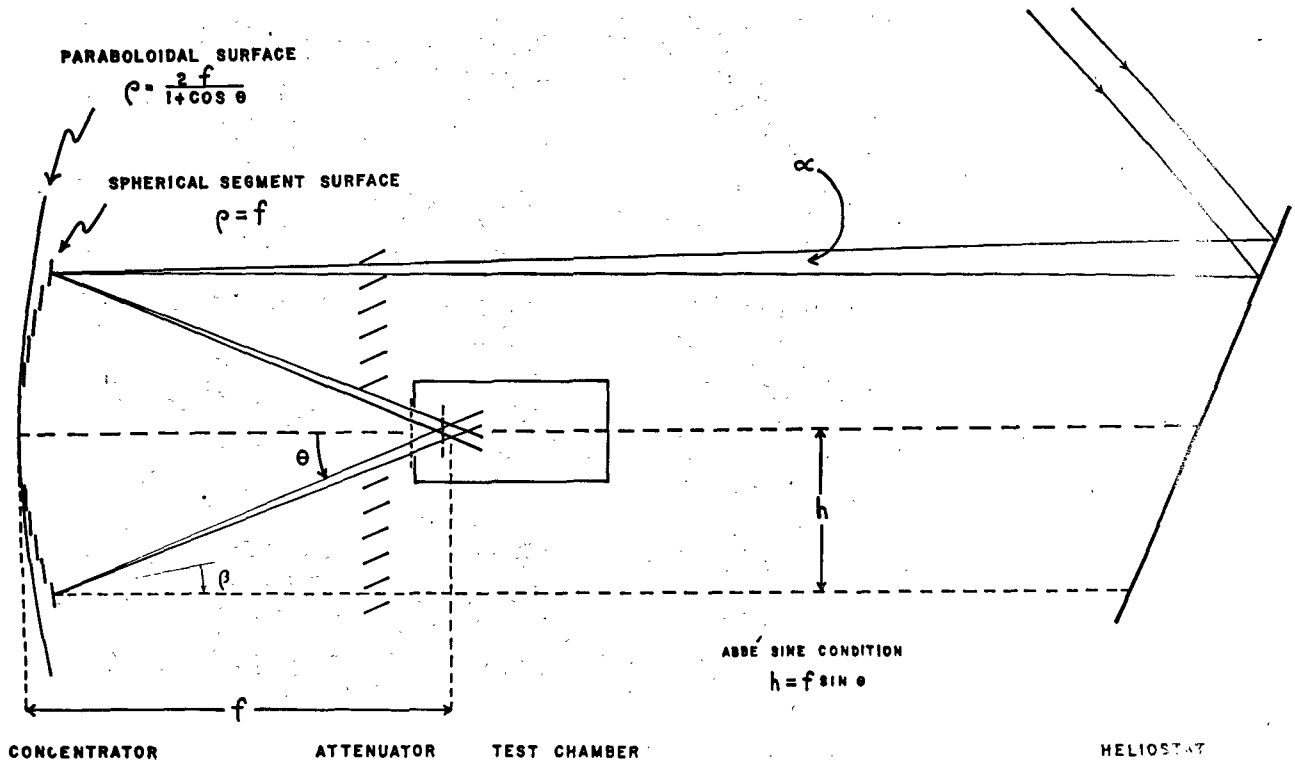


Figure 2. Radiation paths and concentrator shapes

to this paraboloid would have required at least 6 zones of mirrors, within each of which the mirrors could have been identical spherical segments.



Figure 3. Heliostat mirror segments

Having studied these conclusions, we then determined that the number of mirror types could be reduced by relaxing the need for a continuous optical surface, that is, for the mirror edges to be contiguous. Assuming that we could obtain spherical segments at a reasonable cost, we investigated surfaces with fewer zones, and finally with mirror segments which were all identical. As long as the mirror segment could be positioned with respect to the focal plane so that its aberrations were minimized, it was apparent that the shape of the mounting surface was important only from a structural standpoint. Consideration of third-order aberrations indicated that the use of a spherical framework would accomplish this objective and permit the use of identical segments at all points.

The fundamental optical problem was the use of a spherical mirror segment at an off-axis position which would produce its best image at a predetermined point. Geometrical considerations required that the off-axis angle be between  $4^\circ$  and  $32^\circ$ , and as mentioned above, the focal distance of the entire array was to be approximately 10.7 meters. This gives a radius of curvature for each segment (since they are to be all alike) of 21.4 meters. A small mirror of such a long radius can be shown to have negligible spherical aberration and coma (1), so that only astigmatic effects disturb the image. An extended source, such as the solar disk, will thus be imaged at two points by an off-axis spherical segment, the "tangential" and "sagittal" foci. The sagittal focus lies on the symmetry axis of the sphere of

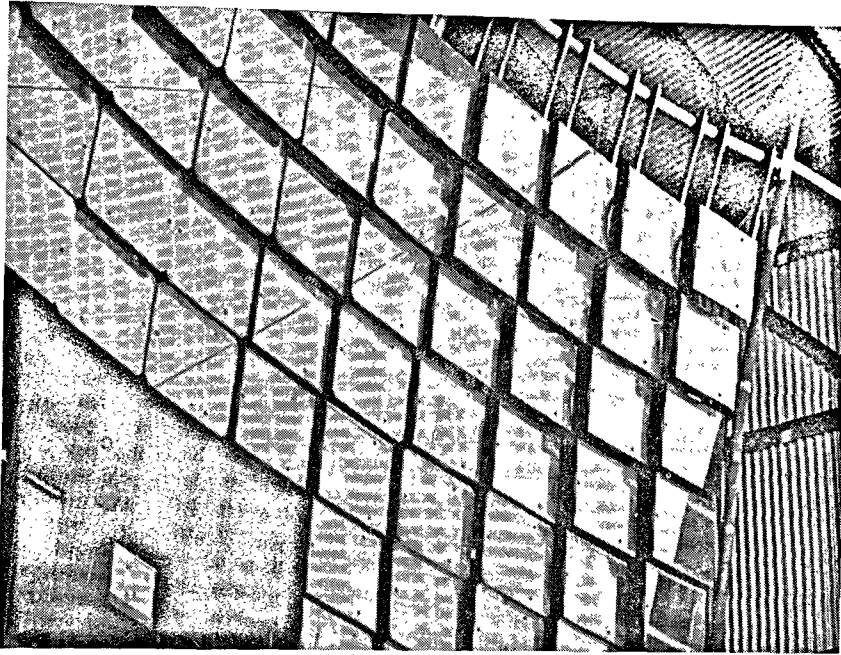


Figure 4. Concentrator mirror segments

which the segment is a part, while the other is nearer the segment by the "astigmatic difference".

$$a_s - a_t = \frac{R}{2} \left( \frac{1}{\cos \beta} - \cos \beta \right)$$

where  $a_s$  and  $a_t$  refer to the image distances from the mirror segment,  $R$  is the radius of curvature, and  $\beta$  is the angle which the incoming radiation makes with the mirror normal. For the maximum value of  $\beta$  contemplated here,  $16^\circ$ , the difference is 8 per cent of the focal length, a significant deviation.

The choice of a "best image" requires some arbitrariness; we define it as the composite image of least area. Allison, Carr and Hughes (4) showed that for a single spherical segment of square shape, imaging the sun, the best image is at  $a_t$  and has a rectangular shape. However, when one considers composite circular images formed by rings of such segments about a symmetry axis, then it is found (5) that the mean image, midway between  $a_s$  and  $a_t$ , is the "best". The mean image position differs from  $R/2$  only by 0.1 per cent for the angles used here; thus, as a first approximation, we may place the individual segments so that their centers lie on a spherical surface which has a radius of curvature one-half of that for the mirrors themselves. Each segment must then be tilted so that its mean image is  $R/2$  from the focal point of the array. (Essentially, this is the same as correcting a spherical reflecting surface of radius  $R$  for spherical aberration by cutting out segments, moving them closer to the focus, and changing the angle of incidence slightly for each one.)

When ray tracing methods were applied to this scheme, substantial agreement was found, except

that at the largest angles of incidence used here, the segments needed to be about 1 per cent closer to the focus. A spherical framework was then designed (5) which held the mirrors rigidly and permitted adjustment for position and angle in agreement with all of these conclusions. The result is an optical concentrator which has properties somewhat different from those calculated for the usual paraboloidal solar furnace.

Baum and Strong (6) have pointed out that the optimum surface for a solar concentrator is one which meets the Abbe sine condition (7); when

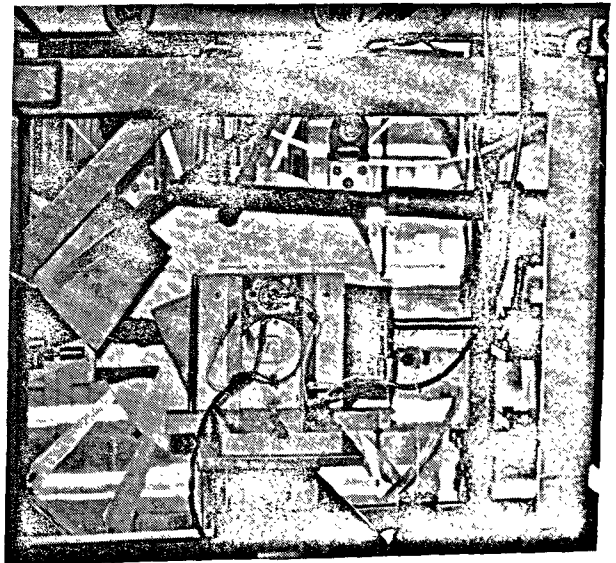


Figure 5. Shutter systems

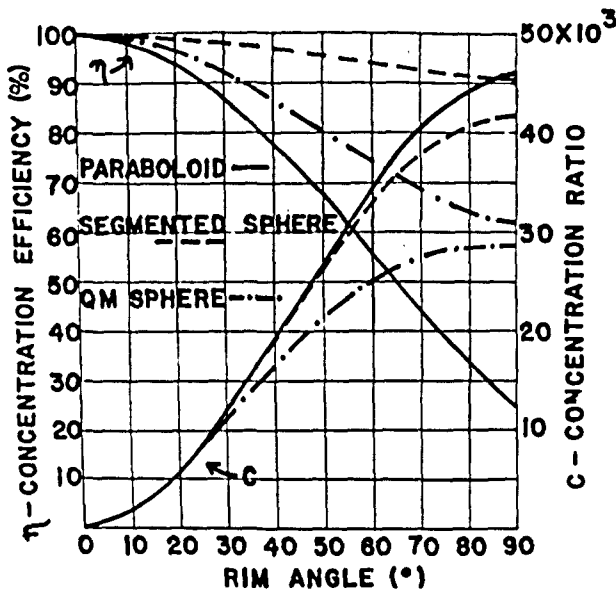


Figure 6. Concentration ratio and efficiency as a function of rim angle

the object plane lies at infinity, this stigmatic condition has the form  $h = f \sin \theta$ , where  $h$  is the perpendicular distance from the concentrator axis to the point of incidence, and  $\theta$  is the angle which the reflected beam makes with this axis. In our case,  $\theta = 2\beta$ , and  $f$  is a constant, so that the

$$W_s = \pi w_o f^2 \left(\frac{8}{15}\right) \left[ (2 - 3 \cos \theta_2) \left(\frac{1 + \cos \theta_2}{2}\right)^{3/2} - (2 - 3 \cos \theta_1) \left(\frac{1 + \cos \theta_1}{2}\right)^{3/2} \right]$$

From these quantities, one may calculate the concentration ratio

$$C = \frac{W}{\pi w_o \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

which is the ratio of flux density in the ideal solar image to the actual flux density received, corrected for reflectivity. This ratio is a function of concentrator geometry; by plotting  $C$  as a function of rim angle  $\theta$ , it can be seen from figure 6 that

$$\frac{C_p}{C_s} > 1$$

at all values of  $\theta$ , where  $\theta_1$  is taken as zero. This interpretation, that no concentrator gathers more light than a paraboloid, can also be shown thermodynamically by calculating the equilibrium temperature attained by a cavity target.

However, the concentration ratio does not measure performance as well as the concentration efficiency, which is the ratio of the flux received within the ideal solar image to the total reflected flux. This is also a function of concentrator geometry and is given by

$$\eta = \frac{W}{w_o A}$$

surface is a sphere with radius  $d/\alpha$ , just as given by the anastigmatic scheme outlined above. These relations are shown schematically in figure 2.

This discontinuous surface has the disadvantage of lost solid angle due to the breaks in the surface. This can be evaluated quantitatively by calculating the concentration efficiency as compared with a paraboloidal surface. Loh *et al.* (8) show that the power contributed to the solar image by a ring element (symmetrical about the optical axis) of a concentrating surface is:

$$dW = \frac{2\pi w_o f^2}{\rho} \sin \theta \cos \theta \cos \theta/2 [(d\rho)^2 + (\rho d\theta)^2]^{1/2}$$

where  $w_o$  is the flux density of the incident radiation and  $\rho$  is the radius of curvature of the segments in the element. This expression assumes that the surface is continuous; we shall account for our surface breaks later. For a paraboloid,

$$\rho = \frac{2f}{1 + \cos \theta}$$

while for a surface satisfying the Abbe condition,  $\rho = f$ .

When these expressions are inserted and the integrals performed for  $\theta_1 < \theta < \theta_2$ , one obtains for the power concentrated by the paraboloid,

$$W_p = \pi w_o f^2 (\sin^2 \theta_2 - \sin^2 \theta_1)$$

and for the spherical surface

where  $A$  is the projected area of the entire concentrator surface on a plane perpendicular to the optical axis. This factor is also plotted in figure 6 for the paraboloidal and spherical (Abbe) surfaces. Because of its increasing radius of curvature and larger area, the paraboloid becomes quite inefficient at large rim angles for concentrating radiation within the ideal image diameter, while the spherical surface retains its efficiency.

Actually, of course, there is no way to create such a surface. By segmenting it, as we have, a considerable part of the total solid angle is lost for concentration purposes. In addition, by using segments of a larger sphere, astigmatic losses occur in the image. These, however, also occur in practical efforts to create a paraboloid, and we can, in general, assume that the precision achieved in simulating a paraboloid can be matched by taking smaller spherical segments of equal precision for another surface.

We have calculated (5) the losses in efficiency and concentration due to the loss of solid angle for the discontinuous surface; these are plotted in figure 6 also. The largest number of mirror segments in our concentrator occurs at about 25° rim angle; these curves show that a paraboloid at that angle concen-

trates 10 per cent more light than the spherical surface and operates at 91 per cent efficiency. A spherical concentrator made with equal precision is 4 per cent smaller in area and operates at 94.5 per cent efficiency. Thus, little difference exists at these rim angles.

The segments we have chosen produce an image which is 42 per cent larger than the ideal image, due to calculated astigmatic effects. Inclusion of the 6 per cent loss due to concentrator inefficiency gives a total geometrical loss of 48 per cent, assuming that the segments are all perfect spheres of radius 21.4 meters. Thus, the form of our furnace would give a geometrical index

$$v = \frac{W(\text{actual})}{W(\text{theoretical})} \approx 0.52$$

However, the estimate of astigmatic image spread assumes that the flux in the peripheral image is uniform. We know that this is not the case, and thus the index would be considerably higher than 0.52, if there were no optical imperfections or alignment errors.

## Performance

### IMAGE PROPERTIES

An objective evaluation of solar furnace performance can be derived by studying the flux density distribution in the region surrounding the focal point. If we use the criterion discussed previously — concentrator efficiency — then we need to measure the distribution of flux density on the plane of maximum convergence, perpendicular to the optical axis. We first calculated (1) the distribution on the assumption of segments which form perfect individual images and are perfectly aligned. This was done by calculating the astigmatic solar image spread for mirrors at various off-axis angles and summing their contributions in annular zones. The zonal contributions were then weighted and a final resultant flux density plotted as a function of image radius. This calculated profile is shown in figure 7. It should be noted that this curve is based upon the actual distribution of radiance across the solar disk averaged over all wave-lengths (9); an image of the sun would be sharply cut off at 9.9 cm if there were no aberrations.

We have measured the flux density produced by our concentrator using instruments of several types and with both pulsed and continuous beams. The most reliable instruments for this purpose have been the Gardon radiometer (10) and the Quarter-master disk calorimeter (11). These measurements give the experimental curve in figure 7, which has been normalized along with the calculated distribution to have a maximum irradiance of 100 cal cm<sup>-2</sup> sec<sup>-1</sup>. (This value, of course, varies with the time of day and year, mirror surface condition and meteorological environment.) We have measured a flux density which exceeds this only on two occa-

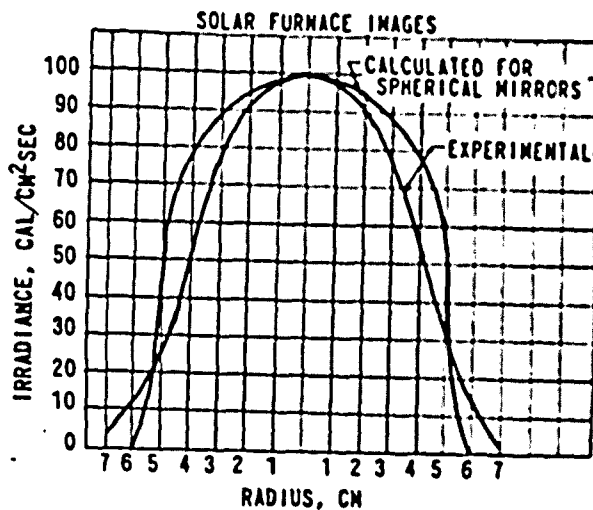


Figure 7. Image contours at focal plane

sions. Geometrical attenuation of the beam does not change this distribution, but lowers the central maximum. As might be expected, the experimental curve has a smaller width at all points within the ideal image diameter. At 0.5 maximum, the width of the image is 8.2 cm, and at 0.9 maximum, it is 4.2 cm. Reduction of the half-width is thus 17 per cent, which represents an image distortion comparable to paraboloidal surfaces and arc-image furnaces. Comparisons of this image shape with other published data are given in table 1, where we have calculated the ratio  $d/D_1$ ;  $D_1$  is the diameter of the image at 0.1 of the maximum irradiance.

Other parameters are also of considerable interest. The concentration efficiency can be calculated by integrating the experimental curve of figure 7 over the area of the ideal solar image and dividing the average flux density so obtained by the theoretical flux density which should be concentrated in this area. We did this by calculating the volumes of concentric cylindrical rings differing in radius by 0.32 cm (1/8-inch), using the flux density scale as the height. Summing these volumes over a total radius of 5.08 cm (for convenience in calculation), we found a total flux of 6348 cal sec<sup>-1</sup>. The average flux per unit area for this area is then

$$\frac{6348}{\pi(5.08)^2} = 78.3 \text{ cal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$

(The value for the ideal image area should be slightly higher than this.) When the maximum was 100 cal cm<sup>-2</sup> sec<sup>-1</sup>, we measured an incident flux in the heliostat beam of .022 cal cm<sup>-2</sup> sec<sup>-1</sup> with an Eppley direct incidence pyroheliometer. The theoretical concentrated flux density in the image area is computed by multiplying this solar constant by the area concentration factor:

$$\frac{69.7 \text{ m}^2}{\pi(4.97)^2} (.022) = 8982 (.022) = 197.6 \text{ cal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$

Table 1. Comparison of published images

Image source	Maximum measured flux density ( $H_m$ ) ( $\text{cal cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ )	Ideal image diam ( $d$ ) (cm)	Diameter at 0.1 $H_m$ ( $D_1$ ) (cm)	$d/D_1$
Quartermaster solar furnace (1)				
Perfect image of solar disk (1) (ideal system) . . . . .	—	9.9	9.9	1.00
Calculated image (1) for spherical segments . . . . .	—	9.9	10.9	.91
Measured image . . . . .	100	9.9	12.4	.80
California Institute of Technology solar furnace (13)				
1 central lens only . . . . .	30	3.7 <sup>a</sup>	4.7 <sup>a</sup>	.79
19 lenses . . . . .	220	3.7 <sup>a</sup>	6.7 <sup>a</sup>	.55
Curtiss-Wright solar furnace (Lazlo, 12)				
60 inch searchlight paraboloid . . . . .	600	.63	.85 (?)	.74 (?)
Defence Research Board solar furnace (17)				
Cassegrain system -- 60 inch paraboloid (Canada) . . . . .	30	2.3	3.0	.77
Massachusetts Institute of Technology solar furnace <sup>b</sup> (3) . . . . .				
	5.5	7.6	9.2	.83
USSR solar furnaces (15, 16)				
10-meter paraboloid . . . . .	23	5.0	34.6	.14
2.05-meter paraboloid . . . . .	864	.74	1.18	.63
Model -- solar heat station <sup>b</sup> . . . . .	1.5	20	26.8	.75
Carbon-arc image furnaces				
Quartermaster single ellipsoid . . . . .	30	4.4	5.3	.83
National Carbon Co. double ellipsoid (14) . . . . .	611	1.2	2.9	.41

<sup>a</sup> Relative units only.

<sup>b</sup> Flat mirror segments.

so that the *over-all* efficiency of the furnace is (at least)

$$\frac{78.3}{197.6} = 39.7 \text{ per cent}$$

This figure includes all losses in the system, such as mirror imperfections, alignment errors, optical design, shadowing and reflection losses. Of these, the last two should be eliminated if one wishes to judge the performance of the concentrator itself. The maximum reflectance of the heliostat mirror is 0.93, and that of the aluminum concentrator mirrors is 0.87. The attenuator was designed to obscure only 7 per cent of the incident radiation when fully opened, and the supporting structures of the test chamber are estimated to obscure about 3 per cent. Thus the maximum flux density which the concentrator could contribute to a theoretical image is actually:  $(197.6)(.93)(.87)(.90) = 143.9 \text{ cal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ . This gives an "index of geometrical perfection" of

$$\frac{78.3}{143.9} = .54$$

which agrees quite well with the minimum value estimated from the calculations of concentration efficiency and astigmatic image spread.

A view of the image zone perpendicular to the optical axis is shown in figure 8. The depth of focus

is quite large, due to the long focal length chosen for our concentrator. The "hole" in the center of the beam at 30 cm behind the focus is caused by the unusable central area of the concentrator. The distribution of figure 8 is not symmetrical about the optical axis, except near the focus, because of the square shape of the concentrator surface. Our principal irradiation planes are at the focus and 20 cm back of it; the latter position yields a 6 cm  $\times$  6 cm area which is approximately uniform, at a reduced irradiance.

#### DIFFICULTIES AND POSSIBLE IMPROVEMENTS

The most serious difficulty we have experienced in our use of the solar furnace is the deterioration of the aluminized coating on the concentrator mirrors. The mirrors are exposed outdoors continuously; this results in a gradual loss of both the aluminum and the silicon-monoxide coating which is evaporated over the aluminum to protect it. Approximate measurements show that a decrease in reflectance from 87 per cent to about 55 per cent can be expected from this weathering process. A small part of the residual reflectance may also be diffuse, which amounts to a further loss. This decrease in reflectance occurs over a period of several months to 2 years, and is quite variable, according to the quality of the aluminum coating. One remedy for this is a periodic renewal of the coatings, which we have

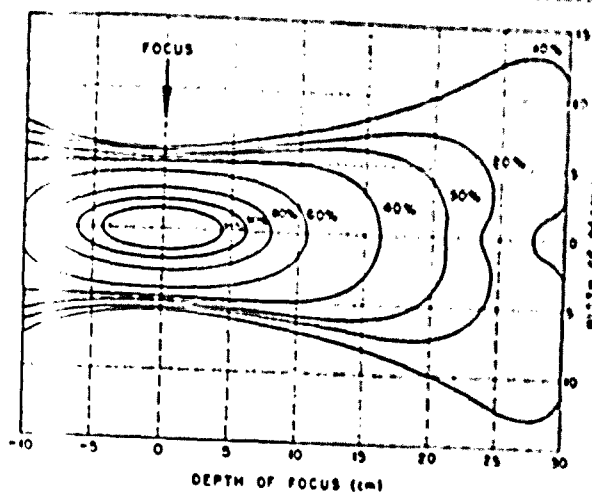


Figure 8. Image contours in horizontal plane

arranged for 100 segments thus far. This solution requires a large amount of mirror handling.

Another solution is the use of back-surface mirrors of water-white glass, as are our heliostat segments. It is not yet possible to slump plate glass to the proper curvature and keep the rear surface smooth, due to the necessary contact with the ceramic mold. The front-surface remains smooth and highly polished, but the rear-surface must be ground and polished if it is to become the reflecting surface. We are now procuring 75 such mirrors for comparison with our first-surface reflectors. These mirrors are much more expensive, because of the grinding and polishing; even though they will be improved optically, the principal gain will be one of increased durability.

In practice, the optical performance of the solar furnace is limited by the heliostat mirror segments and their relative alignment. We have devised a progressive system of heliostat alignment (5) which permits the segments to be placed in parallel planes by autocollimation within 1 minute of arc under good conditions, and within 3 minutes of arc under all conditions. The degree of alignment accuracy is sufficient for the plate glass segments, since many of them deviate from flatness by this amount. The aligned heliostat is used as a base plane for the alignment of the concentrator segments, after the heliostat normal is made parallel to the optical axis. The over-all alignment procedure, which is too lengthy to describe here in detail, could be improved by more stable physical conditions for autocollimation of the heliostat segments. However, the optical performance would still be limited by the quality of the segments themselves.

The automatic guidance system of the heliostat gives satisfactory performance under steady conditions. The position detector receives the reflected solar radiation from one of six heliostat segments at any given time; the detector in turn develops amplitude-dependent error signals in both elevation and azimuth which are given to the two-channel

closed-loop electrical drive system (3). Since the elevation and azimuth rates of apparent motion of the sun vary during the day, the phase lag inherent in each channel will also vary. However, these changes are slow on cloudless days and can be compensated electrically, using frequent image position checks on heat-sensitive paper.

The effects of clouds, haze, and wind are more disturbing to the control system. Cloud coverage exceeding one-half of the sky usually prevents practical use of the furnace; smaller clouds, if well defined, can usually be "waited out", with manual heliostat control being used during their passage. Haze and very thin clouds often cause the most trouble because of fluctuating intensity, which disturbs the tracking gain as well as the concentrated flux density. We use manual control of the tracking gain, separate in each channel, and have instructed the operators to vary the gain according to several prevailing conditions. The effect of wind is to move and shake the heliostat framework, thus moving the concentrated image and also giving false position information to the control system. Although small or large position error signals are rejected by the system at normal gain settings, nevertheless the exposure of samples is delayed until the image position is re-set. We cannot use the heliostat in sustained winds exceeding 20 knots, and for precise image position control, the wind should be under 10 knots.

Possible improvements in image position control lie in sampling a greater number of mirrors on the heliostat for reflected beam direction and in the use of an automatic gain control system. The latter would need to assess the relative importance of several factors on solar intensity, such as system response to wind, cloud fluctuations and time of day; at the present time, this task is more easily performed by an operator.

An important aid in the use of short, repeated radiant exposures would be a monitor which continually measured the concentrated flux density at the exposure position. Due to the necessity for clearance between the sample and the source, and the lack of space at the sample position, such a true monitor is virtually impossible. An instrument which measured a flux density proportional to that delivered to the sample would be acceptable, provided it was truly representative of the concentrated beam and did not confuse flux density changes with solar fluctuations. We have tried several models of such monitors, operating in various positions and according to different schemes, but none of them has been completely successful. At present we are comparing a monitor which employs a foil calorimeter (10) with another type using an array of solar detectors.

### Research uses

The Quartermaster furnace was specifically designed to deliver pulses of radiant energy on flat surfaces of reasonably large dimensions. It was thus necessary to use a long focal length to obtain the desired

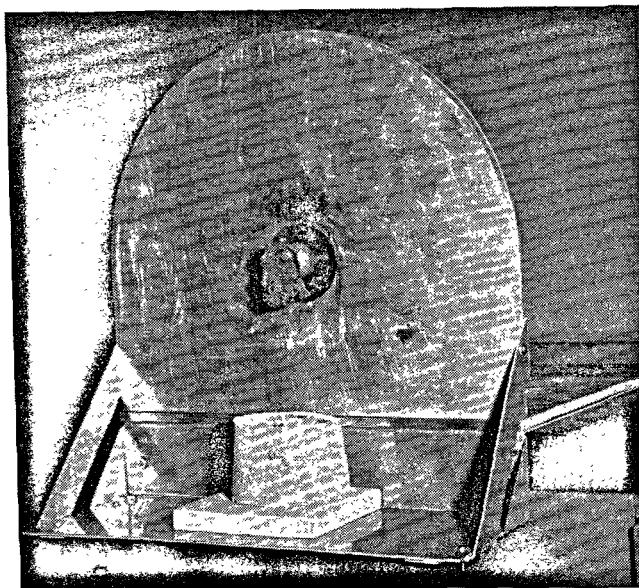


Figure 9. Irradiated steel cylinder

image diameter, while attempting to produce a flux density sufficiently high to be usable on all cloudless days. This result was achieved, and the device has been used since late 1958 for an average of about 400 hours per year in thermal irradiation studies. Through its use, much valuable information regarding the behavior of protective materials has been accumulated.

In recent months, we have begun to utilize the solar furnace beam in studies relating to the thermal properties of materials. The flux density in the center of the image is nearly uniform (within 5 per cent) over an area 2.5 cm in diameter and can thus be used to irradiate the ends of cylindrical rods for one-dimensional heat flow analysis. Bolometer radiometers and fine thermocouples are used to give temperatures at various points in the sample and at the ends during the radiant exposures. A long-focus 16 mm motion picture camera mounted in the center of the concentrator records the surface behavior of such samples under rapid irradiation, particularly after melting has begun. A sample of irradiated stainless steel in its holder shown in figure 9. A chamber is available for exposure of similarly shaped samples in controlled environments, including high vacuum, as shown in figure 10. Constant irradiance pulses applied to the samples can be made as short as 0.1 second by means of the light aluminum shutter blades which expose and cover the sample in 0.01 second intervals. A third shutter system can also be swung into the beam just outside the entrance window in order to deliver pulses with a time-varying flux density. This shutter utilizes radial vanes and is cam-driven at variable speeds, so that a pulse of any prescribed time variation can be reproduced by designing a specific cam shape. The use of the shutter pulses, together with the

manually controlled attenuator, makes it possible to control the heating cycle of samples quite accurately. For specific experiments, automatic temperature control could easily be arranged. The design of receptacles for sample heating should be based on the volume flux density distribution shown in figure 8. We have procured magnesia and zirconia crucibles, 9.5 cm in diameter and 16 cm long, which enclose this "hot zone" quite well.

### Conclusions

Although the Quartermaster furnace is used for research and engineering studies, the experience gained in its design and performance can be utilized in fields which demand less precision in image-forming. We found that the use of slumped plate glass for concave segments is quite satisfactory for almost all applications. The standard deviation in the radius of curvature for our concave segments is approximately the same as for the flat segments used for the heliostat, and indeed it was found possible to match the deviations to some extent by placement on the frameworks (5). Slumped segments are, of course, quite inexpensive compared to ground and polished segments of the same curvature (the ratio is nearly 1:3). The problem of the deterioration of the front reflecting surface might be considerably less in an arid climate; in addition, a more durable coating of lower reflectance could be used. A large installation could also include a vacuum re-coating unit near the concentrator to save on costs and time.

The use of concave segments which are all the same in design is also a cost-saving measure. This method of achieving a concentrator surface reduces the original cost on both segment manufacture and framework construction; less precision is needed

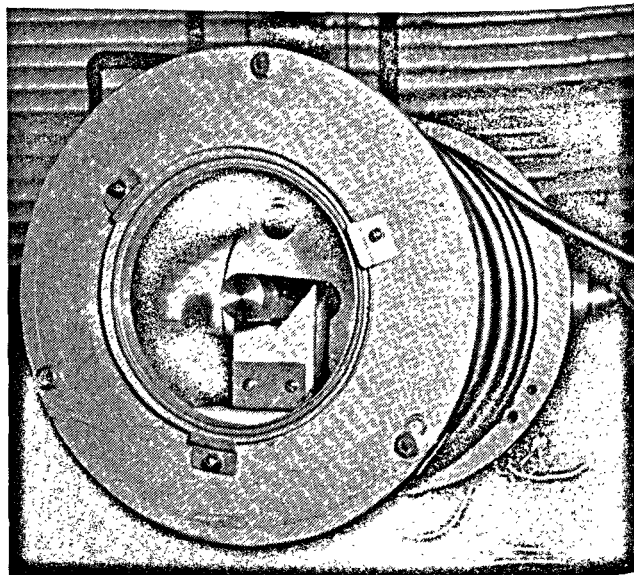


Figure 10. Controlled environment irradiation chamber



for the framework, since the adjustments are made in alignment. For high rim angles, even using spherical segments, more than one curvature might be needed, however, due to the increased astigmatic errors.

Heliostats larger than the one we have used are probably not practical, due to the wind load and alignment problems. In our opinion, a larger installation should utilize more than one heliostat, with the separate units being electronically coupled, as Trombe (2) has suggested. Our design required a horizontal beam, but for general industrial use, an

optical axis parallel to the earth's axis would make the control system more stable, and also would afford some shelter to the heliostat units. The design of Baum and Strong (6) is particularly intriguing.

As with all research equipment, we have devised and installed many improvements in the solar furnace since its initial use, and shall probably continue to do so. However, the performance of the device has amply met all of our original requirements, and we are hopeful that our experience can be of benefit to others who desire to utilize solar energy for specific research or engineering purposes.

## References

1. Davies, J. M. and Cotton, E. S., Design of the Quartermaster Solar Furnace, *Solar Energy* 1, Nos. 2-3:16-22 (1957).
2. Trombe, F., Structures des machines utilisant l'énergie solaire *Wind and Solar Energy*, p. 160, *Proc. New Delhi Symposium*, UNESCO (1954); High Temperature Furnaces, *Proc. World Symposium on Applied Solar Energy*, Stanford Research Institute, 63 (1956); Solar Furnaces and Their Applications, *Solar Energy* 1, Nos. 2-3:9-15 (1957).
3. Cardon, R., A Segmented-Mirror Solar Furnace for High Intensity Thermal Radiation Studies, *Rev. Sci. Inst.* 25: 459 (1954).
4. Allison, F., Carr, H. and Hughes, G., Notes on the Potential Performance of Cloudcroft Solar Furnace, *Solar Furnace Support Studies*, chap. 2, p. 23, US Air Force Missile Development Center, Holloman Air Force Base, New Mexico (1958).
5. The Quartermaster Solar Furnace. Comprehensive report, in preparation.
6. Baum, W. A. and Strong, J. D., Basic Optical Considerations in the Choice of a Design for a Solar Furnace, *Solar Energy* 2, Nos. 3-4: 37 (1958).
7. Born, M. and Wolf, E., *Principles of Optics*, p. 166, Pergamon Press, London (1959).
8. Loh, E., Duwez, P., Hiester, N. K. and Tietz, T. E., Theoretical Considerations on Performance Characteristics of Solar Furnaces. Stanford Research Institute, Report No. 3, Tech. Report No. 1, Menlo Park, California (1956).
9. Abetti, G., *The Sun*, D. Van Nostrand Co., New York (1938).
10. Gardon, R., An Instrument for the Direct Measurement of Intense Thermal Radiation, *Rev. Sci. Inst.* 24:366 (1953).
11. Cotton, E. S. and Levine, A., The QM Disk Calorimeter, Radiation Physics Laboratory Report No. T-28, Pioneering Research Division, Quartermaster Research and Engineering Command, Natick, Massachusetts (1960).
12. Laszlo, T. S., Temperature and Flux vs. Geometrical Perfection, *Solar Energy* 1, Nos. 2-3:78 (1957).
13. Loh, E., Hiester, N. K. and Tietz, T. E., Heat Flux Measurements at the Sun Image of the California Institute of Technology Lens-Type Solar Furnace, *Solar Energy* 1, No. 4:23 (1957).
14. Null, M. R. and Lozier, W. W., Carbon Arc Image Furnaces *Rev. Sci. Inst.* 29:163 (1958).
15. Baum, V. A., Discussion following paper by F. Trombe (Ref. 2). *Wind and Solar Energy*, *Proc. New Delhi Symposium*, UNESCO (1954).
16. Aparisi, R. R., Experimental Methods for the Production of High Temperatures, *Utilization of Solar Energy*, 1:151, Moscow (1957) (in Russian).
17. Wilson, L. G. and Drew, G., A Solar Furnace Using Cassegrain Optics. Defence Research Chemical Laboratories, Report No. 311, Ottawa (1959).

## Summary

The United States Army Quartermaster Corps has been concerned for a number of years with the need for protective materials which may be exposed to intense thermal radiation for short periods of time. To facilitate these studies (1), a solar furnace was completed in September 1958 which produces an image approximately 10 cm in diameter. Since that time, the device, which is the largest in the United States, has been continuously employed in experimental research on the behavior of various materials and systems. This furnace is shown in figure 1.

## Principal features

The Quartermaster solar furnace utilizes a two-mirror optical system; it consists of a movable array of flat mirror segments, called the heliostat, which reflects solar radiation horizontally, and a fixed array of concave mirror segments, called the concentrator, which receives the reflected radiations and forms the convergent beam. These two components are located about 30 meters apart on a meridian, so that the reflected solar radiation from the heliostat is always directed toward the south. Between them is a

framework containing vanes which can be rotated around horizontal axes. These vanes regulate the fraction of the reflected solar radiation which passes from the heliostat to the concentrator. This intervening device is called the attenuator.

The radiation which is focused by each spherical mirror segment on the concentrator produces a solar image at a distance of 10.7 meters. By properly aligning the individual segments, a composite solar image can be formed at a point on the system axis inside the test chamber, a working enclosure and control center for the entire system. Figure 2 shows the radiation paths between the four major components.

### Optical design

We determined that the number of mirror segment types could be reduced by relaxing the need for a continuous optical surface, that is, for the mirror edges to be contiguous. Assuming that we could obtain spherical segments at a reasonable cost, we investigated surfaces with fewer zones, and finally with mirror segments which were all identical. As long as the mirror segment could be positioned with respect to the focal plane so that its aberrations were minimized, it was apparent that the shape of the mounting surface was important only from a structural standpoint.

The choice of a "best image" requires some arbitrariness; we define it as the composite image of least area. When one considers composite circular images formed by rings of spherical segments about a symmetry axis, then it is found that the mean image, midway between the astigmatic images, is the "best". The mean image position differs from  $R/2$  only by 0.1 per cent for the angles used here; thus, as a first approximation, we may place the individual segments so that their centers lie on a spherical surface which has a radius of curvature one-half that for the mirrors themselves. Each segment must then be tilted so that its mean image is  $R/2$  from the focal point of the array.

Baum and Strong (6) have pointed out that the optimum surface for a solar concentrator is one which meets the Abbe sine condition (7); when the object plane lies at infinity, this stigmatic condition has the form  $h = f \sin \theta$ , where  $h$  is the perpendicular distance from the concentrator axis to the point of incidence, and  $\theta$  is the angle which the reflected beam makes with this axis. In our case,  $\theta = 2\beta$ , and  $f$  is a constant, the focal length, so that the surface is a sphere with radius  $\frac{R}{2}$ , just as given by the anastigmatic scheme outlined above. These relations are shown schematically in figure 2.

We have calculated the concentration ratio and concentration efficiency as a function of rim angle for both paraboloidal and spherical segment surfaces. These are shown in figure 6, including curves which take into account the losses due the loss of solid angle for the spherical segment surface. At rim angles

such as we have used, the differences are not large. If one includes the additional loss of flux due to astigmatism for spherical segments, we find that the estimated geometrical index for this type of furnace is greater than 0.52.

### Performance

We have measured the flux density produced by our concentrator using instruments of several types and with both pulsed and continuous beams. The most reliable instruments for this purpose have been the Gardon radiometer (10) and the Quartermaster disk calorimeter (11). These measurements give the experimental curve in figure 7, which has been normalized along with the calculated distribution to have a maximum irradiance of  $100 \text{ cal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ . As might be expected, the experimental curve has a smaller width at all points within the ideal image diameter. At 0.5 maximum, the width of the image is 8.2 cm, and at 0.9 maximum, it is 4.2 cm. Reduction of the half-width is thus 17 per cent, which represents an image distortion comparable to paraboloidal surfaces and arc-image furnaces. Comparisons of this image shape with other published data are given in table 1.

A view of the image zone perpendicular to the optical axis is shown in figure 8. The depth of focus is quite large, due to the long focal length chosen for our concentrator. The "hole" in the center of the beam at 30 cm behind the focus is caused by the unusable central area of the concentrator. The distribution of figure 8 is not symmetrical about the optical axis, except near the focus, because of the square shape of the concentrator surface. Our principal irradiation planes are at the focus and 20 cm back of it; the latter position yields a  $6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$  area, which is approximately uniform, at a reduced irradiance.

By integrating the experimental curve of figure 7 over the area of the ideal solar image and dividing the average flux density so obtained by the theoretical flux density which should be concentrated in this area, we have found an *over-all* furnace efficiency of 39.7 per cent and an "index of geometrical perfection" for the concentrator of 0.54.

### Research uses

The Quartermaster furnace was specifically designed to deliver pulses of radiant energy on flat surfaces of reasonably large dimensions. It was thus necessary to use a long focal length to obtain the desired image diameter, while attempting to produce a flux density sufficiently high to be usable on all cloudless days. This result was achieved, and the device has been used since late 1958 for an average of about 400 hours per year in thermal irradiation studies. Through its use, much valuable information regarding the behavior of protective materials has been accumulated.

In recent months, we have begun to utilize the

solar furnace beam in studies relating to the thermal properties of materials. The flux density in the center of the image is nearly uniform (within 5 per cent) over an area 2.5 cm in diameter and can thus be used to irradiate the ends of cylindrical rods for one-dimensional heat flow analysis. Bolometer radiometers and fine thermocouples are used to give temperatures at various points in the sample and at the ends during the radiant exposures. A long-focus 19 mm motion picture camera mounted in the center of the concentrator records the surface behavior of such samples under rapid irradiation, particularly after melting has begun.

## QUALITÉ DE L'IMAGE ET UTILISATION DU FOUR SOLAIRE DU SERVICE DE L'INTENDANCE DE L'ARMÉE DES ÉTATS-UNIS

### Résumé

Le service de l'Intendance de l'armée des États-Unis s'intéresse depuis nombre d'années à la question des matériaux protecteurs qui peuvent être exposés à des rayonnements thermiques intenses pendant de brefs laps de temps. Pour faciliter ces études (1), on a réalisé, en septembre 1958, un four solaire qui produit une image ayant un diamètre d'environ 10 cm. Depuis cette date, le dispositif, qui est le plus grand qui soit en service aux États-Unis, a été employé continuellement à des travaux de recherches expérimentales sur le comportement de divers matériaux et systèmes. La figure 1 montre ce dispositif.

### Caractéristiques principales

Le four solaire du service de l'Intendance comporte un système optique à deux miroirs. Il est constitué par un jeu mobile d'éléments de miroir plan appelé héliostat, qui reflète le rayonnement solaire horizontalement, et un jeu fixe d'éléments de miroir concave, que l'on appelle le concentrateur, qui reçoit le rayonnement réfléchi et le concentre en un faisceau convergent. Ces deux groupes sont installés à une trentaine de mètres l'un de l'autre sur un méridien, de telle sorte que le rayonnement solaire réfléchi par l'héliostat soit toujours orienté vers le sud. Il y a entre eux un châssis qui soutient des persiennes que l'on peut faire tourner sur des axes horizontaux. Ces persiennes déterminent la fraction de l'énergie solaire réfléchie passant de l'héliostat au concentrateur. On appelle ce dispositif l'atténuateur.

Le rayonnement concentré par chaque élément de miroir sphérique sur le concentrateur, produit une image solaire à une distance de 10,7 mètres. En alignant correctement les éléments en cause, on peut former une image solaire composée en un point de l'axe du système, à l'intérieur de l'enceinte d'essai, qui constitue l'enceinte de travail et le centre de commande pour l'ensemble du système. On voit

### Conclusions

Although the Quartermaster furnace is used for research and engineering studies, the experience gained in its design and performance can be utilized in fields which demand less precision in image-forming. We found that the use of slumped plate glass for concave segments is quite satisfactory for almost all applications, and that the use of segments all having the same design is quite economical. We are hopeful that our experience with optical components and image properties can be of benefit to others who desire to use solar furnaces.

à la figure 2 les trajets du rayonnement entre les quatre principaux éléments.

### Conception optique

On a déterminé que le nombre de types d'éléments de miroir pourrait être réduit en s'attachant moins à ce que la surface soit continue, c'est-à-dire en s'efforçant moins de rendre les bords des éléments de miroir contigus. En partant de l'hypothèse que l'on peut produire des éléments sphériques à un prix raisonnable, on a étudié des surfaces ayant de moindres nombres d'éléments et, finalement, on a utilisé des éléments de miroir identiques entre eux. Pour autant qu'il était possible de disposer un élément de miroir par rapport au plan focal de telle sorte que les aberrations soient réduites au minimum, il était manifeste que la forme de la surface servant de support n'avait d'importance que du point de vue structurel.

Le choix de ce que l'on appelle « la meilleure image » exige des décisions un peu arbitraires. Nous la définissons comme étant l'image composée ayant la moindre surface. Si on étudie les images circulaires composées, formées par des couronnes sphériques disposées autour d'un axe de symétrie, on découvre que l'image moyenne, située à mi-distance entre les images astigmatiques, est « la meilleure ». La position de l'image moyenne ne s'écarte de  $R/2$  que de 0,1 p. 100 pour les angles dont nous avons fait usage, si bien qu'on peut, en première approximation, disposer les segments sphériques de telle sorte que leurs centres soient alignés sur une surface sphérique dont le rayon de courbure est la moitié de celui des miroirs eux-mêmes. Chaque élément doit alors être incliné de telle sorte que son image moyenne se trouve à une distance  $R/2$  du foyer du système.

Baum et Strong (6) ont souligné que la surface idéale, pour un concentrateur solaire, est celle qui

satisfait la règle du sinus de Abbe (7); quand le plan de l'objet est à l'infini, cette condition stigmatique s'écrit  $h = f \sin \theta$ , où  $h$  est la distance perpendiculaire de l'axe du concentrateur au point d'incidence et  $\theta$  l'angle que le faisceau réfléchi fait avec l'axe. Dans notre cas,  $\theta = 2\beta$  et  $f$  est une constante, la distance focale, si bien que la surface en cause est une sphère dont le rayon est  $\frac{R}{2}$ , tout comme il était indiqué

par le plan anastigmatique mentionné ci-dessus. Ces rapports sont schématisés à la figure 2.

Nous avons calculé le rapport de concentration et le rendement de la concentration en fonction de l'angle du bord pour des surfaces d'éléments paraboloides et sphériques. On les représente à la figure 6, ainsi que des courbes établies en tenant compte des pertes dues à la perte d'un angle solide pour l'élément de surface sphérique considérée. Avec des angles de bord tels que ceux que nous avons employés, les différences ne sont pas grandes. Si on tient compte des pertes supplémentaires de flux qui sont dues à l'astigmatisme des segments sphériques, on trouve que l'indice géométrique approché pour ce genre de four est supérieur à 0,52.

### Rendement

On a mesuré la densité de flux produite par le concentrateur en se servant d'instruments de plusieurs types, tant avec des faisceaux à impulsions qu'avec des faisceaux continus. Les instruments les plus sûrs, pour ce genre de travail, ont été le radiomètre (10) de Gardon et le calorimètre (11) à disque du service de l'Intendance des États-Unis. Ces mesures ont donné la courbe expérimentale de la figure 7 qui a été normalisée en même temps que la répartition calculée pour donner une irradiation maximum de  $100 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec}^{-1}$ . Ainsi que l'on pouvait s'y attendre, la courbe expérimentale est de moindre largeur, en tous points, dans le cadre du diamètre de l'image idéale. Au maximum de 0,5 la largeur de l'image est de 8,2 et au maximum de 0,9 elle est de 4,2 cm. La réduction de la demi-largeur est donc de 17 p. 100, ce qui représente une déformation d'image comparable à celles que donnent les paraboloides et les fours à image d'arc. Des comparaisons entre cette forme d'image et les autres données publiées figurent au tableau 1.

Une vue de la zone de l'image perpendiculaire à l'axe optique est donnée à la figure 8. La profondeur de foyer est considérable en raison de la grande distance focale choisie pour le concentrateur. La discontinuité au centre du faisceau, à 30 cm en arrière du foyer, est due à la région centrale inutilisable du concentrateur. La répartition de la figure 8 n'est pas symétrique par rapport à l'axe optique, sauf au voisinage du foyer, en raison de la forme carrée de la surface du concentrateur. Les plans principaux pour l'irradiation se trouvent au foyer et à 20 cm derrière ce foyer; cette dernière position donne une surface de 6 cm sur 6 cm qui est approximativement uniforme, avec une irradiation réduite.

En intégrant sous la courbe expérimentale de la figure 7, de manière à couvrir la surface de l'image solaire idéale, et en divisant la densité moyenne de flux ainsi obtenu par la densité théorique de ce flux qui doit être concentrée dans cette région, on obtient un rendement global pour le four, de 39,7 p. 100, avec un indice de perfection géométrique, pour le concentrateur, de 0,54.

### Application du matériel aux recherches

Le four du service de l'Intendance a été conçu spécifiquement pour fournir des impulsions d'énergie rayonnante sur des surfaces plates de dimensions assez grandes. Il était donc nécessaire d'utiliser une grande distance focale pour obtenir le diamètre d'image cherché, tout en s'efforçant de produire une densité de flux suffisamment élevée pour qu'elle soit utilisable pendant tous les jours sans nuages. On a réalisé ce résultat et le dispositif est en service depuis fin 1958, 400 heures par an en moyenne, pour les études sur le rayonnement thermique. Au cours de cette période d'utilisation, on a réussi à se procurer nombre de données utiles ayant trait au comportement des matériaux protecteurs.

Au cours de ces derniers mois, nous avons commencé à faire usage du faisceau produit par le four solaire pour des études portant sur les qualités thermiques des matériaux. La densité de flux, au centre de l'image, est presque uniforme (3,5 p. 100 près), pour une surface ayant un diamètre de 2,5 cm, et on peut donc s'en servir pour irradier les extrémités de barres cylindriques aux fins des analyses du régime d'écoulement de la chaleur dans des conditions monodimensionnelles. Des radiomètres à bolomètre et des thermocouples de précision sont utilisés pour donner la température aux divers points de l'échantillon et en ses extrémités pendant les expositions au rayonnement. Une caméra de cinéma à grande distance focale, qui utilise du film de 16 mm, montée au centre du concentrateur, enregistre le comportement de la surface de ces échantillons soumis à une irradiation rapide, particulièrement après le début de la fusion.

### Conclusion

Bien que le four du service de l'Intendance soit utilisé aux fins de recherches et de divers travaux d'ordre technique, l'expérience acquise en le mettant au point et en l'utilisant peut être appliquée dans des domaines qui exigent une moindre précision quant à la formation de l'image. Nous avons observé que l'utilisation de verre en plaques déprimées pour les segments concaves est tout à fait satisfaisante quant à la quasi-totalité des applications et que l'emploi d'éléments de profil identique est très économique. Nous espérons que notre expérience sera de quelque valeur pour les autres chercheurs qui désirent se servir de fours solaires.

## MESURE DES TEMPÉRATURES AU FOUR SOLAIRE

M. Foëx \*

Le contrôle des traitements effectués au moyen des fours solaires nécessite la mise au point de méthodes pratiques de mesures des températures<sup>1</sup>, susceptibles d'être employées dans le domaine d'utilisation de ces fours, c'est-à-dire entre 2 000 °C et 3 000 °C (1 à 5).

Les thermocouples réfractaires (iridium/iridium-rhodium, tungstène/rhénium, etc.) peuvent rendre parfois quelques services, mais ils présentent l'inconvénient de se contaminer rapidement à haute température au contact de la plupart des produits réfractaires ou des vapeurs émises par les substances traitées. Leur emploi sera donc tout à fait exceptionnel.

La mesure par des moyens optiques de la température d'une surface placée au foyer d'un four solaire, et qui est ainsi soumise directement à l'action du rayonnement de haut éclairement énergétique, est perturbée à la fois par le facteur d'émission de cette substance et par les réflexions parasites du rayonnement solaire non absorbé. Les erreurs dues à ces deux causes sont liées ensemble mais varient en sens inverse; le premier facteur donne en effet toujours des erreurs par défaut, le second des erreurs par excès. Seules ne présenteraient pas cet inconvénient, s'il en existait, les substances absorbant parfaitement les rayonnements de différentes longueurs d'onde (corps noir). Dans la pratique, les mesures présentent le plus souvent des erreurs par excès.

La répartition énergétique du rayonnement solaire tel qu'il arrive aux confins de l'atmosphère terrestre ressemble quelque peu à celui d'un corps noir à 6 000 °K (figure 1). A la surface de la terre, cette répartition est quelque peu perturbée par la traversée de l'atmosphère. Ce rayonnement est dans tous les cas très riche en radiations visibles, alors que les produits traités, dont la température se situe vers 2 000 °C ou 3 000 °C, présentent un maximum d'émission compris entre 1,5 et 1 micron. Il s'ensuit que des mesures effectuées avec un pyromètre monochromatique à disparition de filament fonctionnant dans le rouge vers 0,65 micron sont fortement perturbées par le rayonnement du soleil dans ce domaine de longueur d'onde, même si la fraction

réfléchi est relativement faible. Ces erreurs sont cependant bien moindres à haute qu'à basse température, le rayonnement émis par la substance traitée étant alors dans une certaine mesure plus proche de celui du soleil. Par ailleurs, l'influence parasite des radiations solaires est moindre dans l'infrarouge.

Les pyromètres à radiation totale donnent également presque toujours des indications trop élevées, surtout lorsqu'une part notable du rayonnement solaire est diffusée par la substance traitée.

Nous avons considéré dans ce qui précède que le rayonnement solaire était réfléchi essentiellement d'une façon diffuse. Lorsque l'on a affaire à des surfaces métalliques ou à des produits fondus, il est possible d'éviter l'action parasite du rayonnement solaire en procédant à des visées en dehors des zones de réflexion. Dans la généralité des cas, il est nécessaire d'utiliser certains dispositifs spéciaux pour se placer à l'abri de l'action parasite du soleil. Nous allons examiner quelques-uns d'entre eux.

### Procédés comportant l'utilisation de filtres

On place sur le trajet du rayonnement solaire incident un filtre présentant une bande d'absorption intense pour un domaine bien défini de longueurs d'onde, mais laissant passer autant que possible le reste du rayonnement solaire, de façon à ne diminuer que légèrement l'énergie reçue au foyer. On procède aux mesures de températures de la substance traitée au moyen d'un pyromètre optique muni lui-même d'un filtre « monochromatique » interférentiel opaque pour l'ensemble du rayonnement du soleil, à l'exception toutefois d'une bande de transmission correspondant à la bande d'absorption du premier filtre.

Considérons le cas d'un four solaire de petite puissance, de 2 kW par exemple, comportant un miroir parabolique fixe de deux mètres de diamètre et 0,85 mètre de distance focale, placé à l'intérieur d'un laboratoire et recevant par une ouverture le rayonnement réfléchi par un miroir orienteur plan mobile. Une méthode commode consiste à fermer cette ouverture par une plaque de Plexiglas. Une plaque de 15 mm d'épaisseur permet d'absorber pratiquement la totalité du rayonnement de longueur d'onde voisine de 1,7 microns (figure 2) et laisse passer environ 75 p. 100 du rayonnement solaire: Le Plexiglas est en effet très transparent pour le visible et le proche infrarouge, domaine où le soleil rayonne la plus grande partie de son énergie. On note pour le Plexiglas, au-dessus de 2 microns, l'existence

\* Laboratoire de l'énergie solaire du Centre national de la recherche scientifique, Mont-Louis, Pyrénées-Orientales, France.

<sup>1</sup> Les mesures d'énergie sont effectuées soit avec un calorimètre à circulation d'eau (1), soit au moyen de petites masses de cuivre dont on mesure la vitesse d'échauffement au moyen de thermocouples très fins, à très faible inertie, utilisés en liaison avec un enregistreur à réponse très rapide.

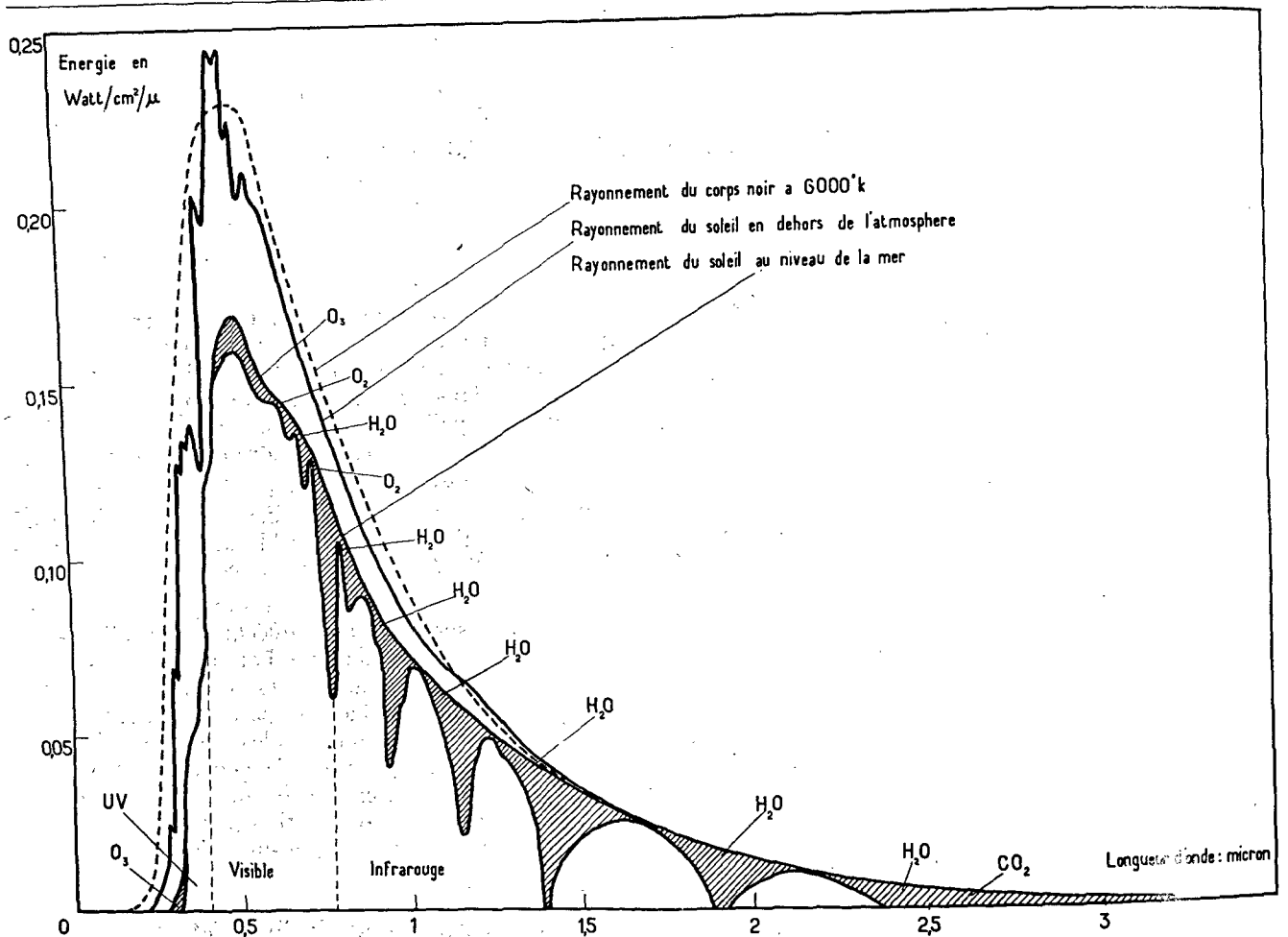


Figure 1. Répartition énergétique du rayonnement solaire (6)

de bandes d'absorption très intenses; malheureusement, il est difficile de trouver des filtres monochromatiques pour ces régions du spectre.

Une autre méthode consiste à utiliser les bandes d'absorption de l'atmosphère (figure 3) dues à la vapeur d'eau, au gaz carbonique, à l'ozone, etc. Les bandes données par la vapeur d'eau dans l'infrarouge vers 1,4 ou 1,9 microns sont d'une utilisation particulièrement commode, mais leur intensité est naturellement variable avec la hauteur du soleil, l'altitude du lieu, l'humidité de l'atmosphère, et la présence ou l'absence de poussières ou de fumées. Il conviendra donc, avant chaque série de mesures, de déterminer pour la longueur d'onde considérée l'intensité résiduelle du rayonnement solaire. Certaines des bandes d'absorption de l'atmosphère étant très voisines de celles du Plexiglas, il est possible de combiner leur action. On note en particulier dans les deux cas de fortes bandes d'absorption vers 1,4 microns.

Dans l'infrarouge plus lointain, certaines combinaisons de filtres permettent de définir des domaines de radiation, par exemple une combinaison de sulfure de plomb et de verre de silice laisse passer la plus

grande partie du rayonnement compris entre 3 et 4 microns.

Les méthodes précédentes nécessitent l'usage de pyromètres sensibles au rayonnement infrarouge, c'est-à-dire d'appareils fonctionnant avec des thermopiles ou avec des cellules photo-électriques. Dans tous les cas, il est nécessaire de bien définir la surface à haute température visée par le pyromètre. On y parviendra en plaçant devant la matière traitée ou l'entrée du four un écran percé d'un orifice de diamètre bien déterminé, inférieur à celui de la surface de visée. Afin de ne pas obturer une part trop importante du rayonnement solaire incident, cet écran devra être décalé en avant du four. Les fours solaires permettant de localiser les effets thermiques le pyromètre peut être placé près de l'échantillon sans soumettre cet appareil à un échauffement excessif.

L'usage des filtres précédents nécessite l'emploi de pyromètres sensibles à l'infrarouge. Afin de se servir de l'œil, il serait utile de disposer d'un filtre réalisable en grande dimension, absorbant le rayonnement vers 0,65 micron, ce qui est le cas de certains filtres en gélatine; mais ils sont malheureusement fragiles et ne peuvent être exposés longtemps à

la lumière. Par ailleurs, des filtres infrarouges du type manganal ont été essayés par F. Trombe et l'auteur (1); ils absorbent 80 p. 100 du rayonnement solaire, mais sont excellents lorsque l'on ne désire pas travailler au-dessus de 2 000 °C.

### Procédés avec occultation du rayonnement solaire

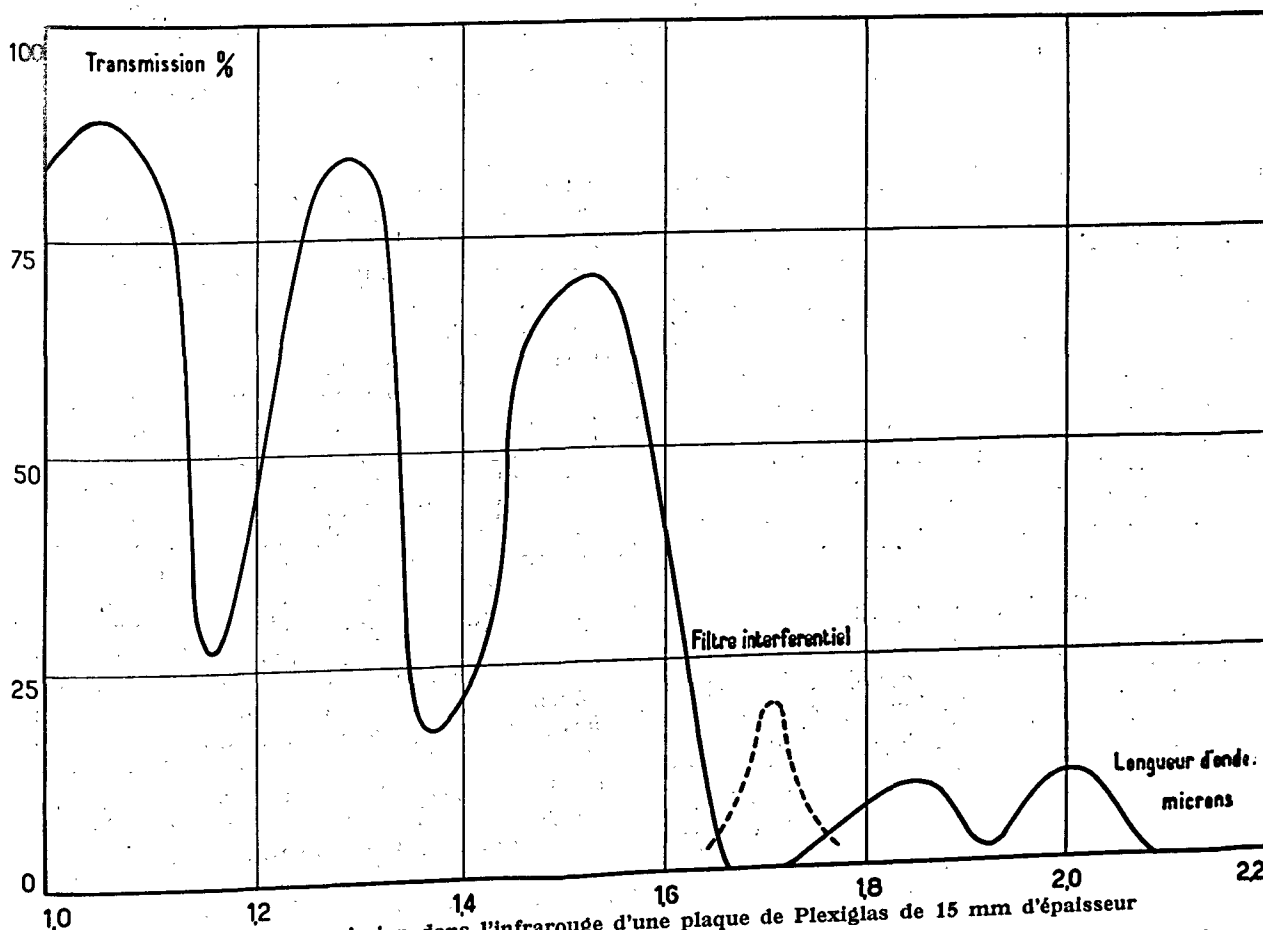
Un procédé très simple consiste, au moment des mesures de températures, à occulter le rayonnement du soleil avec un écran. Cependant, lorsque la quantité de matière traitée est faible (installation de petite puissance), le passage de l'écran doit être rapide afin d'éviter un refroidissement excessif de la matière. Ceci rend difficile l'emploi de pyromètres à disparition de filament.

Afin d'éviter cet inconvénient, Conn et Braught (8) ont utilisé des écrans tournants synchronisés obturant le rayonnement solaire incident au moment où le rayonnement de la substance chauffée parvient au pyromètre, et inversement. Dans ces conditions, il est possible d'employer un pyromètre monochromatique à disparition de filament, l'œil ayant une impression d'éclairement continu lorsque la vitesse de rotation des disques est suffisante. L'emploi d'une telle méthode limite cependant notablement l'énergie reçue par la substance.

On a utilisé, au Laboratoire de l'énergie solaire de Mont-Louis, des pyromètres optiques à cellule photo-électrique susceptibles de procéder aux mesures, en 1/100 de seconde par exemple, pendant le temps très court du passage de l'écran. Ces pyromètres (9) sont équipés d'une cellule photo-électrique au césium, avec un amplificateur à courant continu, et à alimentation stabilisée, permettant d'obtenir un gain d'amplification de l'ordre de 5 000. Le courant obtenu peut atteindre plusieurs milliampères, ce qui permet de procéder à des enregistrements au moyen d'un oscillographe à aimant mobile présentant une très faible inertie.

Les écrans, afin de ne pas présenter de trop grandes dimensions et être maniables rapidement, doivent être placés entre le miroir parabolique et le foyer. Ils ont le plus souvent une forme cylindrique ou tronconique, et sont susceptibles de se déplacer suivant l'axe de l'installation en se rapprochant ou en s'éloignant du foyer. On peut également les faire tourner autour d'un axe parallèle à celui de l'installation (voir plus loin, figure 5).

Au lieu d'obturer complètement le rayonnement solaire incident, il est aussi possible de procéder à l'occultation momentanée d'une fraction bien déterminée de ce rayonnement. Si cette fraction est assez faible (10 p. 100 par exemple), le temps de passage de l'écran pourra être relativement long (une ou



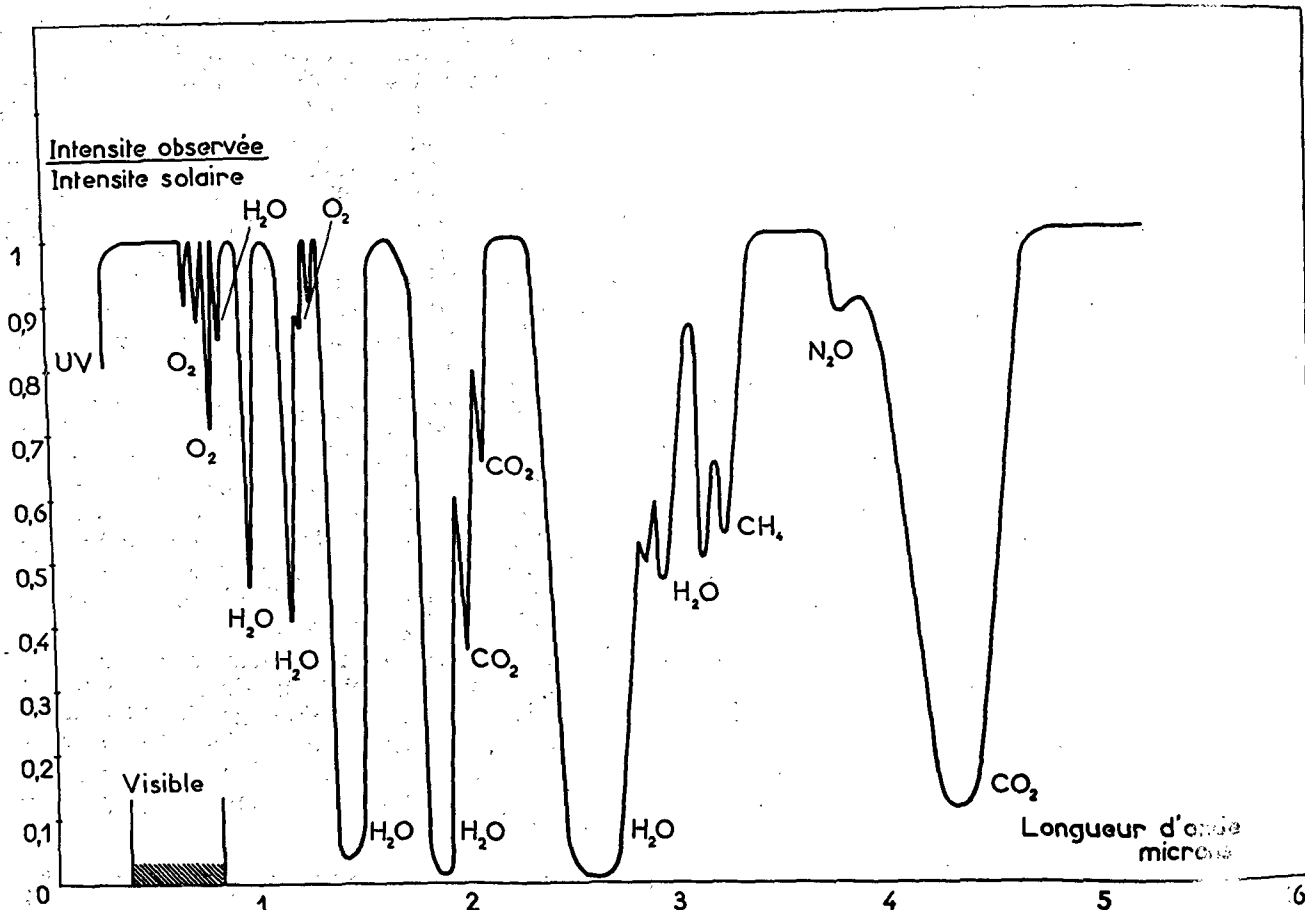


Figure 3. Bandes d'absorption de l'atmosphère dans l'infrarouge (d'après Peckin et Schatzman) (7)

quelques secondes), l'évolution de la température étant limitée par la masse du produit traité, surtout lorsqu'on opère avec des installations puissantes et avec de grandes quantités de produits. La comparaison des températures apparentes observées en l'absence et en présence d'une occultation partielle permet d'évaluer les corrections à faire concernant l'action perturbatrice du soleil. Dans le même ordre d'idée, le rayonnement solaire incident peut être en principe modulé par un écran tournant, afin de le distinguer du rayonnement émis par la substance. Les dispositifs précédents ne dispensent naturellement pas de réaliser des corps noirs ou de procéder à des corrections de facteur d'émission.

### Constitution de corps noirs

Il existe un gradient de température souvent considérable dans les substances dont la surface est soumise directement à l'action d'un rayonnement de haut éclairement énergétique. La réalisation d'un corps noir en pratiquant une cavité dans le produit normalement à la surface insolée est donc une opération assez difficile. Les cavités doivent en effet être très peu profondes et les diamètres encore plus faibles.

Au lieu de placer la substance directement au foyer de façon à ce que sa surface coïncide avec le plan focal,

il est possible de constituer avec cette substance un creuset présentant un orifice placé au foyer. Le rayonnement admis par l'orifice provoque un échauffement progressif des parois du creuset, dont la température tend à s'homogénéiser par réflexions successives ou par rayonnement.

Dans le cas d'un produit fondu, on pourra avantageusement utiliser les fours centrifuges mis au point en collaboration avec F. Trombe (1). Le produit étudié, en poudre, est placé dans une cuve métallique tournant autour de son axe et percée d'un orifice axial correspondant au foyer de l'installation (voir plus loin, figure 6). Sous l'action du rayonnement et de la force centrifuge, la poudre fond et se cavite. Il est nécessaire de régler l'allure de la rotation de façon à ce que la masse fondue forme une cavité continue adhérente à la poudre, et présente un fond dans la zone centrale opposée à l'orifice d'accès du rayonnement. La température des parois est assez uniforme et peu supérieure à celle du point de fusion du produit traité. Il est encore possible d'homogénéiser la température de la masse fondue en créant des mouvements de convection au moyen de variations périodiques de vitesse de rotation. Les « creusets » fondus ainsi constitués avec un four de 2 kW ont une longueur atteignant 35 mm et un diamètre voisin de 12 mm au voisinage de l'orifice; ils sont



## Corrections du facteur d'émission

Il est souvent difficile de constituer un corps noir convenable dans les substances soumises superficiellement à l'action d'un rayonnement de haut éclairement énergétique. D'où parfois la nécessité, pour déterminer correctement les températures, de connaître les facteurs d'émission des substances examinées. Le facteur d'émission évolue d'une façon irréversible lorsque, la température s'élevant, le produit se « fritte » plus ou moins, ou se fendille. On doit donc, lorsqu'on effectue des mesures à haute température, procéder à ces déterminations au moment même des mesures.

Ainsi, par exemple, une brique d'alumine blanche formée de grains fins n'absorbe que très peu le rayonnement solaire et n'est portée qu'à quelques centaines de degrés sous l'action d'un flux de plusieurs centaines de watts au  $\text{cm}^2$ . Mais il suffit d'augmenter un peu cette énergie ou de créer localement une absorption plus importante (corps étrangers, cavité, etc.), pour provoquer brutalement (en une ou quelques secondes) un début de fusion de la masse. Contrairement au produit polycristallin très divisé, la masse fondue absorbe fortement le rayonnement solaire. La fusion une fois commencée se poursuit, même si on

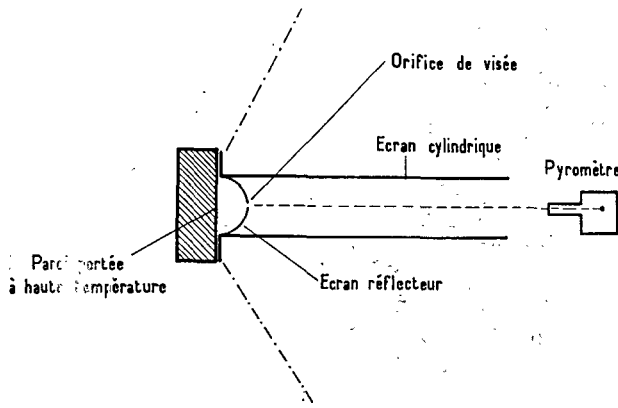


Figure 4. Dispositif avec écran réflecteur permettant de procéder à la mesure de la température d'une paroi soumise à un rayonnement de haut éclairement énergétique

susceptibles de servir de corps noir pour la mesure des températures.

Dans les différents cas précédents, il est encore nécessaire d'éviter les perturbations dues au rayonnement solaire, des réflexions se produisant sur les parois des cavités formées.

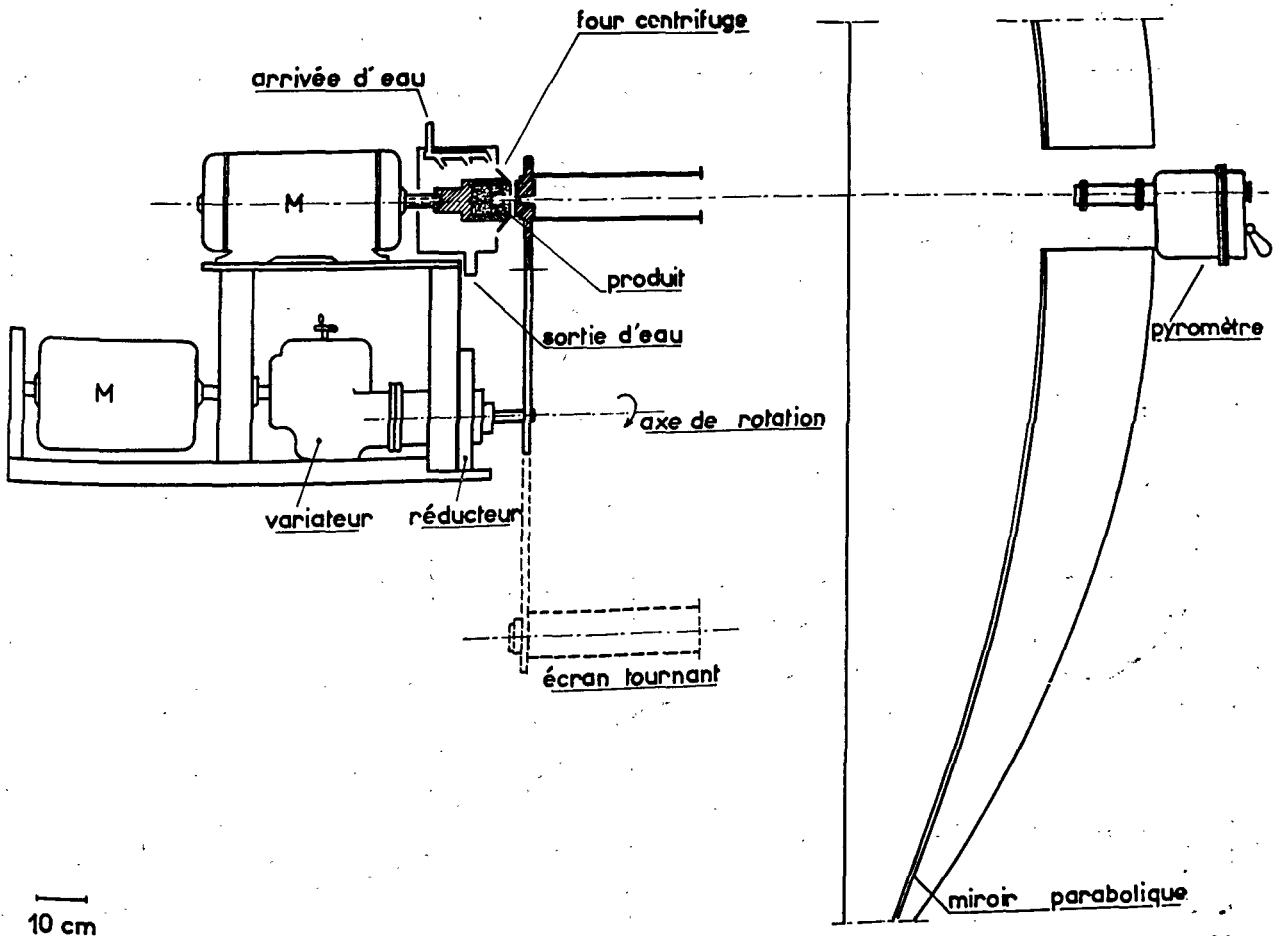


Figure 5. Dispositif d'écran tournant permettant d'occulter rapidement le rayonnement solaire en vue de procéder à des mesures de température à l'aide d'un pyromètre à réponse rapide

réduit beaucoup l'énergie incidente, mais en dessous d'une certaine valeur de cette dernière, la solidification se produit et la température tombe rapidement à une valeur très inférieure.

Dans le cas où la substance étudiée réfléchit d'une façon diffuse la partie du rayonnement solaire qu'elle n'absorbe pas, on peut effectuer la mesure du facteur d'émission en comparant la réflexion diffuse précédente à celle présentée par un corps étalon (plaque métallique dépolie et réfrigérée par un courant d'eau) placé en lieu et place de la substance étudiée. Il est naturellement nécessaire de tenir compte de l'émission propre du produit porté à haute température.

Notons que Glaser et Blau (10) ont mis au point une méthode permettant de mesurer l'émissivité, en fonction de la longueur d'onde, d'une substance portée à haute température au moyen d'un four solaire. Ces auteurs utilisent un spectrographe Perkin Elmer et procèdent à des mesures en présence et en l'absence du rayonnement incident (écrans tournants synchronisés). Ils procèdent ainsi à des mesures de températures.

L'usage de pyromètres à deux couleurs permet, par comparaison de mesures faites pour deux longueurs d'onde différentes, de déterminer à la fois la température et le facteur d'émission de la substance exa-

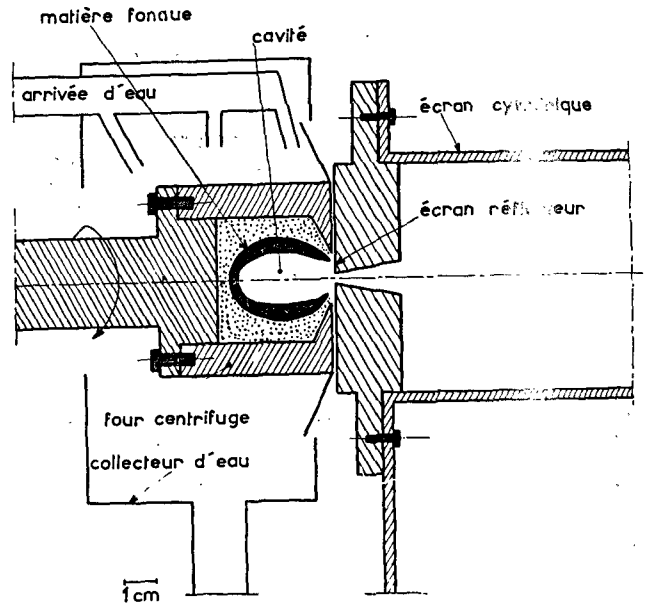


Figure 6. Dispositif pour la mesure des points de fusion des produits réfractaires, comportant un four centrifuge et un écran tournant

minée. Ce facteur d'émission est supposé le même pour les deux longueurs d'onde, ce qui est généra-

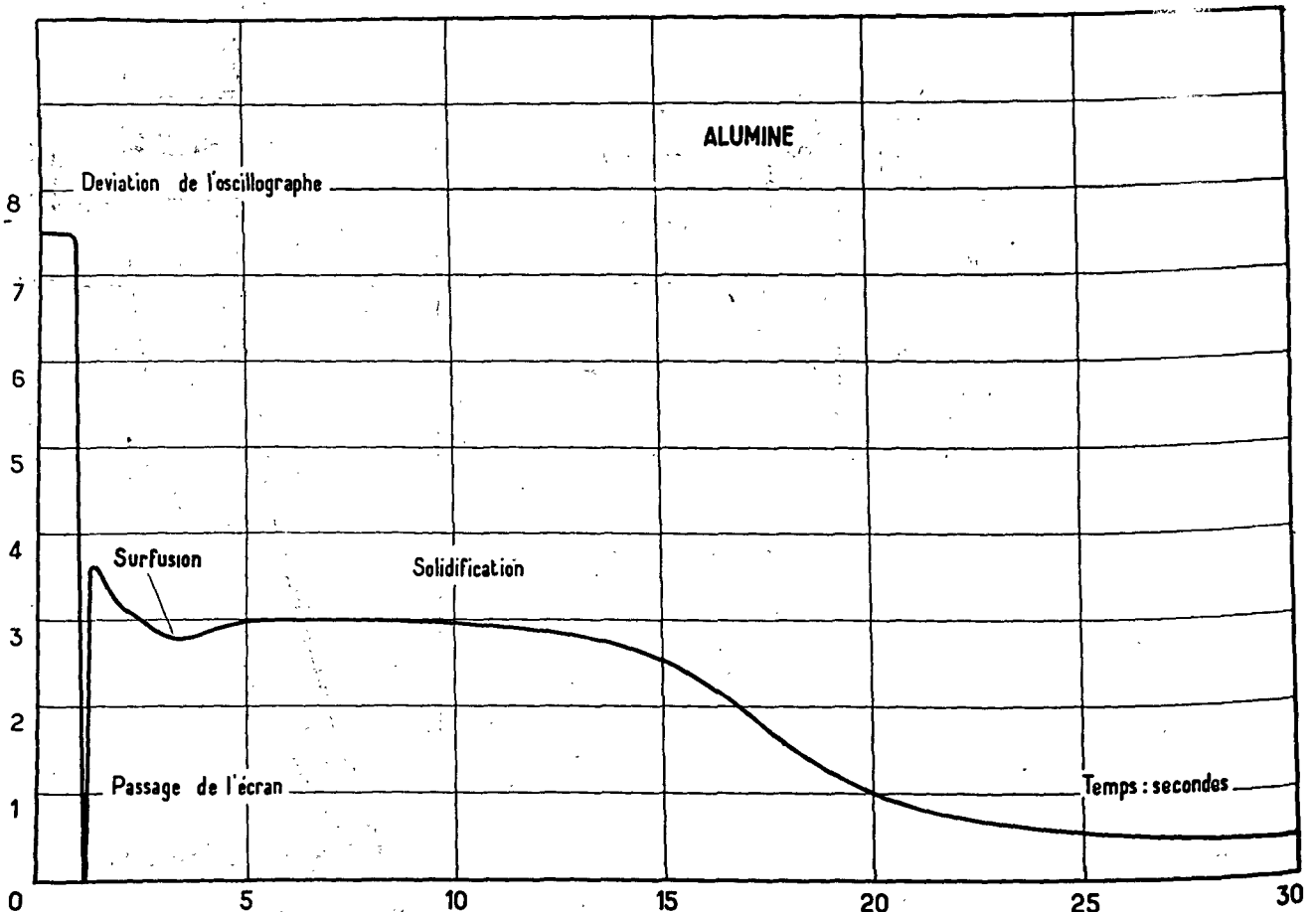


Figure 7. Courbe de solidification de l'alumine

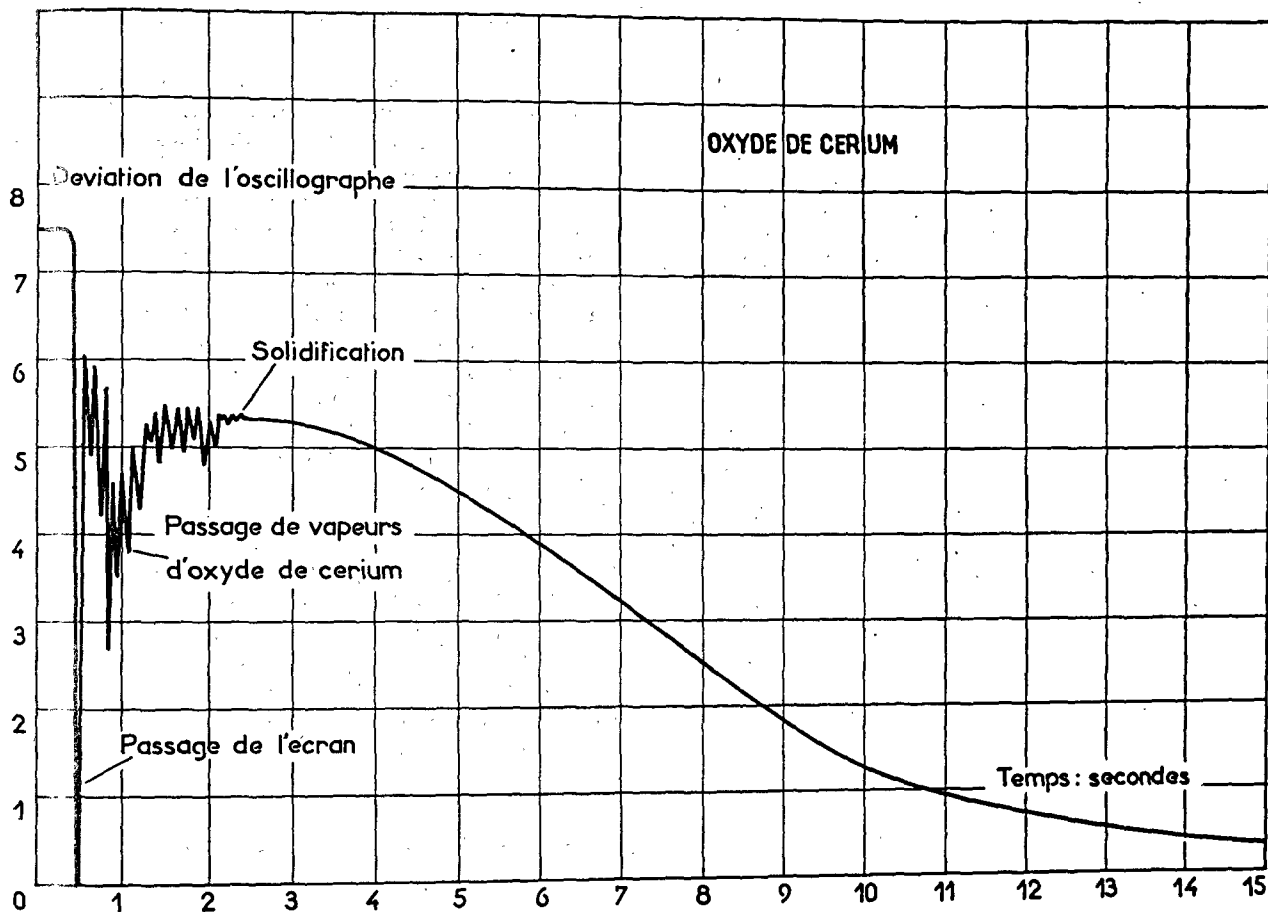


Figure 8. Courbe de solidification de l'oxyde de cérium

lement vrai lorsque ces dernières ne sont pas trop éloignées.

On a procédé à un certain nombre de mesures de facteurs de réflexion dans le cas particulier d'un produit fondu en visant alternativement, au moyen d'un pyromètre monochromatique à disparition de filaments, les zones correspondant aux réflexions du soleil et les zones voisines. En prenant comme étalon une plaque métallique réfrigérée polie de réflexion connue, on a obtenu les valeurs suivantes concernant les facteurs monochromatiques (0,65 micron) d'émission de certains oxydes.

SiO <sub>2</sub> . . . . .	4	p. 100
TiO <sub>2</sub> . . . . .	12	p. 100
ZrO <sub>2</sub> . . . . .	13	p. 100
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	5	p. 100
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	12	p. 100
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	14	p. 100
Cr <sub>2</sub> MgO <sub>4</sub> . . . . .	11,5	p. 100

Ces oxydes fondus sont, à l'exception de la silice, pratiquement opaques sous une épaisseur de l'ordre de quelques millimètres ou du centimètre. Lorsque l'épaisseur est trop faible, on note de fortes réflexions du rayonnement solaire sur le produit solide sous-jacent. Ces réflexions sont susceptibles de fausser les mesures de température (11).

Dans le cas d'une paroi soumise à l'action d'un rayonnement de haut éclairement énergétique, on peut éviter de déterminer le facteur d'émission grâce à l'emploi d'un écran métallique concave réfléchissant fortement le rayonnement émis par le produit porté à haute température, ce qui a pour effet de reconstituer, par un jeu de réflexions successives, des conditions assez analogues à celles du corps noir (figure 4). L'écran défile rapidement (1/10 de seconde par exemple) devant la paroi, et la mesure de température est faite au moyen d'un pyromètre à réponse rapide, par visée à travers un orifice pratiqué dans l'écran réflecteur.

La partie externe de l'écran arrête le rayonnement solaire incident au moment de la mesure, cependant que la paroi portée à haute température n'a pas le temps de refroidir sensiblement.

#### Mesure des points de solidification des oxydes réfractaires

Dans le montage que l'on a utilisé à Mont-Louis pour la mesure des points de solidification, l'oxyde réfractaire utilisé est placé dans un four centrifuge (figures 5 et 6) suivant le procédé décrit ci-dessus.

Afin d'éviter une cavitation trop importante, la substance doit être préalablement fondue, broyée et introduite à l'intérieur de la capacité métallique sous forme de poudre assez grossière (grains de quelques dixièmes de millimètre).

On provoque la solidification en obturant le rayonnement solaire au moyen d'un écran cylindrique tournant qui vient stopper brusquement devant l'ouverture du four centrifuge. Un trou de visée, disposé dans la partie centrale de l'écran, vient alors se placer dans l'axe de l'installation, devant l'orifice du four.

L'écran tournant, dont la face dirigée vers le four est en cuivre argenté, présente une capacité calorifique suffisante pour ne pas s'échauffer exagérément. On note que le pyromètre à cellule photo-électrique utilisé est placé dans l'axe de l'installation au centre du miroir parabolique de 2 mètres de diamètre, percé à cet effet; il n'y a donc pas interposition de prisme ou réflecteur quelconque sur le trajet du rayonnement provenant du four. Au moment de l'obturation, le rayonnement provenant du produit fondu parvient au pyromètre par l'orifice de visée, en l'absence de tout rayonnement susceptible de perturber les mesures. Les indications du pyromètre sont enregistrées au moyen d'un appareil à réponses

rapides susceptible de fonctionner au 1/100 de seconde.

On a donné (figures 7 à 10) un certain nombre de courbes correspondant au refroidissement de masses d'oxydes réfractaires de quelques dizaines de grammes, fondues avec un four solaire de 2 kW. L'appareil comporte plusieurs sensibilités; à titre d'indication, notons que 1 p. 100 de la déviation dans la partie centrale ne représente guère que 3° pour des températures de l'ordre de 2 000 °C.

Au cours de la solidification, on observe les trois périodes suivantes : 1) refroidissement à l'état fondu avec légère diminution de la température du produit, ainsi que parfois une légère surfusion (figure 7, relative au corindon); 2) solidification à température à peu près constante, pendant un temps plus ou moins long pouvant atteindre près de dix secondes; 3) refroidissement à l'état solide, d'abord relativement lent, puis devenant plus rapide, enfin de plus en plus lent au fur et à mesure que la température s'abaisse.

Lorsque le produit présente une forte tension de vapeur, comme dans le cas de l'oxyde de cérium (figure 8), les vapeurs produites obturent plus ou moins le rayonnement au moment où elles passent devant l'orifice de visée, mais ce phénomène est très court et n'empêche pas toujours les mesures. De plus,

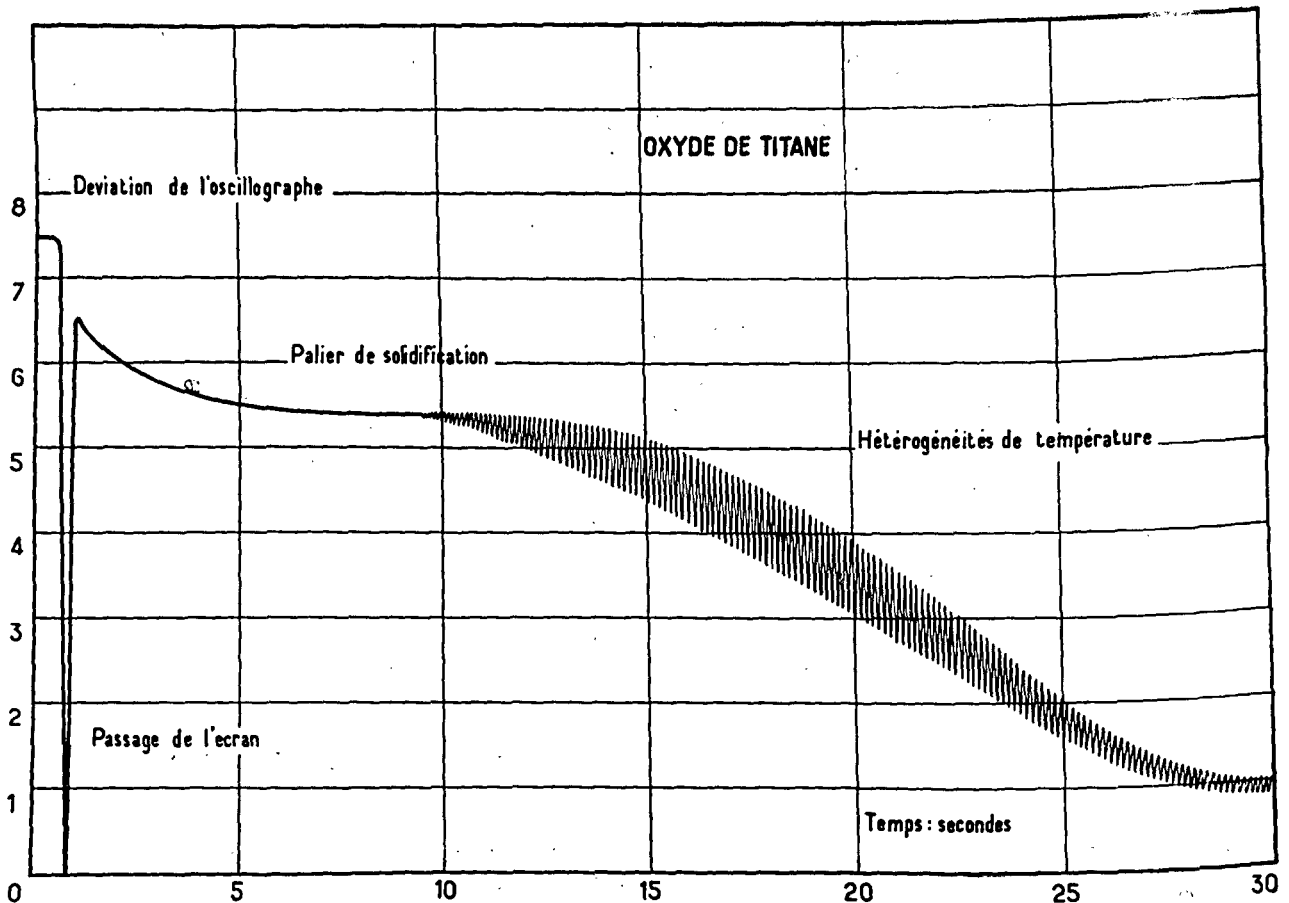


Figure 9. Courbe de solidification de l'oxyde de titane

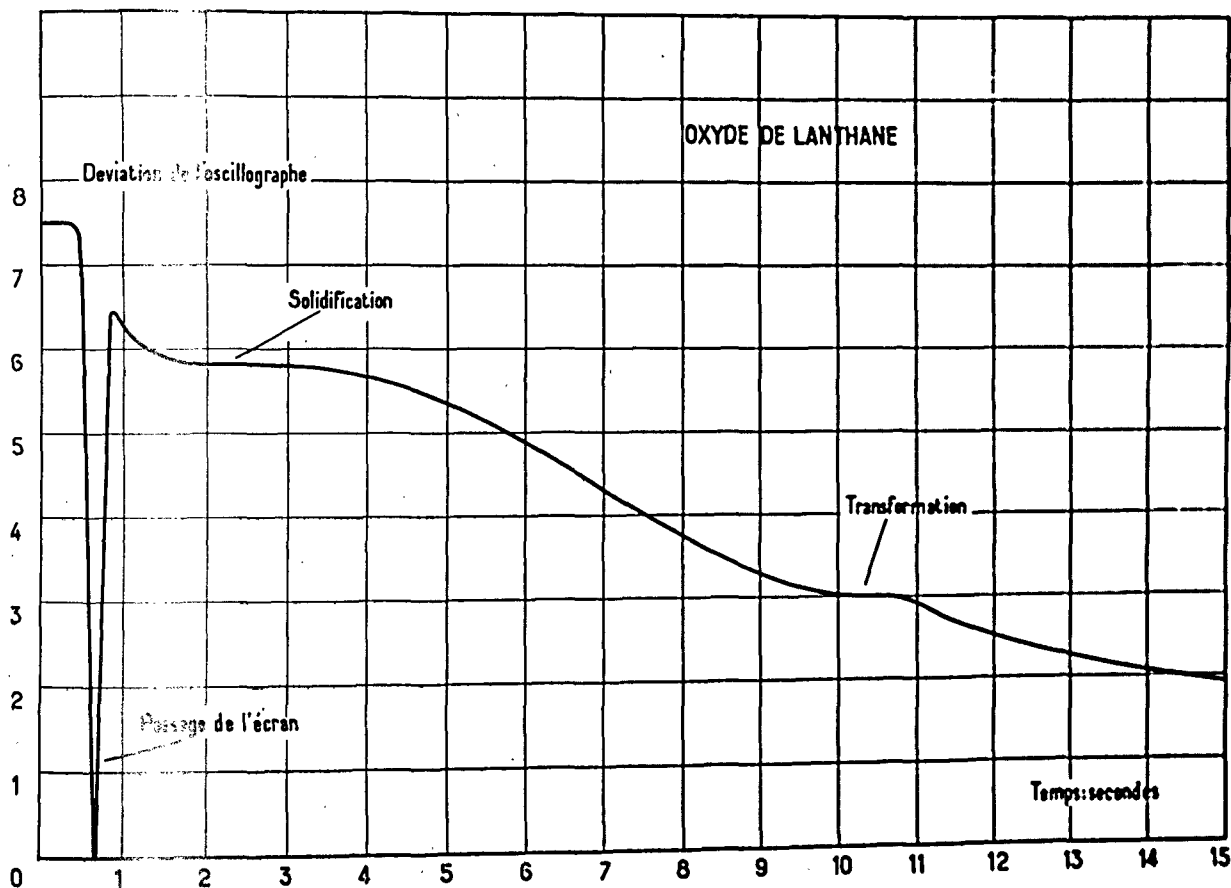


Figure 10. Courbe de solidification de l'oxyde de lanthane

il est possible de chasser ces vapeurs par un courant gazeux passant à travers l'orifice en direction du four.

Des hétérogénéités de températures même minimales de la masse se traduisent par des oscillations dont la période est liée à la vitesse de rotation. Il convient de rejeter les résultats ainsi obtenus lorsque les oscillations ont lieu au moment de la solidification, mais le plus souvent on constate ce phénomène après solidification, certaines parties se refroidissant plus vite que d'autres (figure 9).

Les étalonnages sont effectués au moyen d'une lampe à ruban de tungstène, par comparaison avec différents pyromètres monochromatiques à disparition de filament, cependant qu'une lampe de référence permet de déceler à tout moment les évolutions de la cellule. Les différents points de fusion suivants ont tous été déterminés par comparaison avec

celui du corindon ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), pour lequel une valeur de  $2\,040\text{ }^\circ\text{C}$  a été adoptée. On trouve ainsi :

$\text{TiO}_2$ . . . . .	1 850 °C	$\text{ZrCaO}_4$ . . . . .	2 350 °C
$\text{NiO}$ . . . . .	1 950 °C	$\text{Y}_2\text{O}_3$ . . . . .	2 420 °C
$\text{Al}_2\text{O}_3$ . . . . .	2 040 °C	$\text{CeO}_2$ . . . . .	2 460 °C
$\text{La}_2\text{O}_3$ . . . . .	2 290 °C	$\text{CaO}$ . . . . .	2 590 °C
$\text{Cr}_2\text{O}_3$ . . . . .	2 290 °C	$\text{ZrO}_2$ . . . . .	2 690 °C
$\text{Cr}_2\text{MgO}_4$ . . . . .	2 340 °C		

Le procédé d'analyse thermique précédemment décrit s'applique non seulement aux mesures de points de solidification de composés définis, mais encore à tout phénomène d'ordre transitoire se traduisant par un effet thermique ou optique, et en particulier aux transformations allotropiques diverses. Nous avons ainsi noté pour les oxydes de lanthane (figure 10), d'yttrium et de zirconium, des anomalies très nettes, respectivement à  $2\,100\text{ }^\circ\text{C}$  ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ),  $2\,280\text{ }^\circ\text{C}$  ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) et  $2\,360\text{ }^\circ\text{C}$  ( $\text{ZrO}_2$ ).

## Références

1. Trombe, F., Foëx, M. et Henry La Blanchetais, C., *Conditions de réception de l'énergie solaire au foyer d'un miroir parabolique*, Colloque sur l'énergie solaire, CNRS, Mont-Louis, 1958.
2. Foëx, M., *Remarques sur les mesures de température des substances traitées au four solaire*, Colloque sur l'énergie solaire, CNRS, Mont-Louis, 1958.
3. Foëx, M., Observations on Temperature Measurements of Materials heated with a Solar Furnace, *Proceedings of an International Symposium on High Temperature Technology*, 313, Asilomar, California, 1959.
4. Foëx, M., Remarques sur la détermination des propriétés des substances portées à hautes températures au moyen de fours solaires, *Journal des recherches du CNRS*, n° 50, 17, 1960.
5. Brenden, B. B., Newkirk, H. W., Jr. et Woodcock, S. H., A study of Temperature Measurement in a Solar Furnace, *J. Solar Energy Sci. and Eng.*, 2, 8, 1958.
6. *Handbook of Geophysics*, Revised Edition, Macmillan Co., New York, 1961.
7. Peckin, J. C. et Schatzman, E., *Astrophysique générale*, Masson, Paris, 1959.
8. Conn, W. M. et Braught, C., Separation of Incident and Emitted Radiations in a Solar Furnace by Means of Rotating Sector, *J. Opt. Soc. Amer.*, 44, 45, 1954.
9. Rey, J. P., *Pyromètre sans inertie à cellule photo-électrique*, Colloque sur l'énergie solaire, CNRS, Mont-Louis, 1958.
10. Glaser, P. E. et Blau, H. H., *On the Measurement of High Temperature Radiation Properties of Solids*, Colloque sur l'énergie solaire, CNRS, Mont-Louis, 1958.
11. Diamond, J. J. et Schneider, S. J., Apparent Temperature Measure at Melting Points of Some Metal Oxides in a Solar Furnace, *J. Amer. Ceramic Society*, 43, 1, 1960.

## Résumé

Les mesures de températures, par pyrométrie optique, des substances traitées au moyen des fours solaires sont perturbées fortement par les réflexions parasites du rayonnement incident. Les valeurs ainsi obtenues sont généralement trop élevées.

Il est possible de pallier à cet inconvénient au moyen de combinaisons de filtres. On place sur le trajet du rayonnement solaire incident un filtre présentant une bande d'absorption intense pour un domaine bien défini de longueur d'onde, mais laissant passer autant que possible le reste du rayonnement solaire, afin de ne pas trop abaisser l'énergie incidente. Le Plexiglas, par exemple, répond bien à ces impératifs (bande d'absorption 1,7 microns entre autres); de même que l'atmosphère (bandes d'absorption de la vapeur d'eau dans l'infrarouge). On procède aux mesures de températures de la substance traitée au moyen d'un pyromètre optique muni lui-même d'un filtre « monochromatique » interférentiel transparent pour le domaine de longueur d'onde précédemment défini, mais opaque pour le reste du rayonnement.

Un autre procédé consiste au moment des mesures de températures à occulter le rayonnement du soleil avec un écran. Lorsque la quantité de matière traitée est faible, le passage de l'écran doit être très rapide, afin d'éviter un refroidissement de la matière. On utilise alors un pyromètre à cellules photo-électriques.

Il existe un gradient de température, souvent considérable, dans les substances dont la surface est soumise directement à l'action d'un rayonnement d'un haut éclairement énergétique. La constitution de corps noirs convenables par formation de petites cavités y est donc fort délicate. Dans le cas des substances fondues, il est facile de former des corps noirs en procédant à la fusion de ces matières, dans des fours centrifuges, de façon à constituer des cavités de dimensions relativement importantes présentant un orifice qui correspond au foyer des appareils.

Diverses méthodes permettent de procéder aux corrections de facteur d'émission, en particulier l'emploi d'écrans réflecteurs à défilement rapide passant au voisinage de la substance traitée. On a par ailleurs déterminé les facteurs de réflexions de certains oxydes fondus.

Enfin, on examine une méthode permettant d'effectuer, au moyen de pyromètres à réponse rapide, l'étude de différents phénomènes transitoires, et en particulier la mesure des points de solidification des oxydes réfractaires, fondant entre 1 800 et 2 700 °C et celle de certaines transformations. Ce procédé consiste à utiliser un four centrifuge contenant la substance à traiter, ainsi qu'un pyromètre à cellule photo-électrique à faible inertie (1/100 de sec) associés à un enregistreur à réponse rapide.

## TEMPERATURE MEASUREMENTS IN THE SOLAR FURNACE

## Summary

The optical pyrometry of substances treated in the solar furnace is subject to a major source of error. The parasitic reflections of the incident radiation generally make the readings too high.

This situation may be alleviated by means of a combination of filters. The filter placed in the path of the incoming solar radiation has an intense absorption band in a very definite wavelength region, but

passes as much of the remaining radiation as possible, to avoid excessive decrease of the incident radiation. Plexiglass, for instance, meets these requirements well (absorption band at 1.7 micron, among others), and so does air (infra-red absorption band due to water vapour). The temperatures of the treated substances are measured by an optical pyrometer, itself provided with an interference "monochromatic" filter transparent for the wavelength region defined above, but opaque to the remainder of the radiation.

Another method is to occlude the solar radiation with a screen when measuring the temperature. When the quantity of material being treated is small, the passage of the screen must be very rapid to avoid cooling the material. In that case, a photo-cell pyrometer is used.

There is a temperature gradient, often considerable, in substances whose surface is directly subjected to the action of radiation of high irradiance. It is thus a very delicate task to prepare black bodies

suitable for pyrometry by forming small cavities. In the case of molten substances, black-body formation is easily accomplished by melting in centrifugal furnaces in order to form cavities of relatively large size with an orifice corresponding to the focus of the furnace.

The emission factor can be corrected by various methods, especially by using reflecting screens passed rapidly near the treated substance. The reflection factor of certain molten oxides has also been determined.

Finally, the paper discusses a method using rapid-response pyrometers to study various transitory phenomena, and, in particular, to measure the solidification points of refractory oxides melting between 1800 and 2700 °C, as well as the temperature of certain transformations. This method employs a centrifugal furnace containing the substance to be treated, together with a low-inertia (0.01 s) photo-cell pyrometer in conjunction with a rapid-response recorder.

## INDUSTRIAL APPLICATIONS — THE CHALLENGE TO SOLAR FURNACE RESEARCH

*Peter E. Glaser \**

In the past decade, interest in the use of solar energy has been spurred on by the increase in energy demands from all over the world due to the rapidly expanding populations. To meet these demands in the face of dwindling reserves of fossil fuels, devices capable of utilizing solar energy have been studied and developed. Among these devices, solar furnaces have received considerable attention (1).

By concentrating radiation at the focus of a paraboloidal mirror, a solar furnace can be used to generate high temperatures. Figure 1 shows a number of solar furnace configurations. A material exposed to the high temperatures generated in a solar furnace is not contaminated by furnace vapors or the walls of a crucible. Furthermore, the material can be exposed to air or other gases or heated in a vacuum; the interfering effects of electric or magnetic fields are eliminated; and instruments can be brought close to the heated zone without being subjected to excessive heat. The tantalizing vision of large solar furnaces for a variety of industrial applications has stimulated research in the fields of solar furnace design and construction, development of instruments, experimental investigations and industrial applications.

This paper discusses recent developments in the construction of reflecting surfaces, the measurement of the most important variables, experimental research already accomplished, and the potential of industrial applications of solar furnaces.

### Construction of reflecting surfaces

Solar energy is a very diffuse form of energy. Approximately 1 kilowatt can be collected on each square meter. Therefore, large collectors are required to obtain useful heat fluxes. The construction of large solar furnaces has been impeded by the necessity for using large paraboloidal reflectors to collect the solar energy. Figure 2 shows the diameter of a solar furnace required to produce a desired heat flux at the focal point. It can be seen that the diameter of a solar furnace should be at least 10 feet to achieve industrial usefulness.

The construction of a large paraboloidal reflector and supporting structure contributes the largest share to the cost of a solar furnace. Efforts to reduce these costs by the development of suitable materials for paraboloidal reflectors are of great practical significance.

### GLASS REFLECTORS

Most large solar furnaces constructed and designed to date (2, 3) have used glass for the reflecting concentrator. Large paraboloidal concentrators have been constructed by mounting mirrors in the form of small segments or concentric rings on a paraboloidal shell. The individual mirrors are stressed so that their shape conforms to the local curvature of the paraboloid. Although solar furnaces using these mirrors have been operated successfully, the cost of construction of the supports for the individual mirror elements makes this design approach economically unattractive.

### ALUMINUM REFLECTORS

The development and requirements of accurate radar antennas has directly benefited the design of solar furnaces. The antennas require a large reflector having a shape that approaches as closely as possible the curvature of the paraboloid. Figure 3 shows an antenna made of a 30-foot diameter aluminum reflector that conforms to the shape of a paraboloid within 1/16 of an inch at the rim.

Aluminum sheets, 80 feet long and 30 feet wide, can be formed (including those with compound curvatures) to any desired contour by use of new forming process. Sheets formed by this process have been used in the construction of the 30-foot diameter unit shown in figure 3. The root mean square deviation of 600 measured points was 0.033 inch and the maximum deviation of any point from the true paraboloidal shape was 0.080 inch.

Another process for forming large sheets to a desired paraboloidal shape is explosive forming. In this process, large sheets are formed against the surface of an accurate mold by application of sudden gas pressures obtained from explosive compounds.

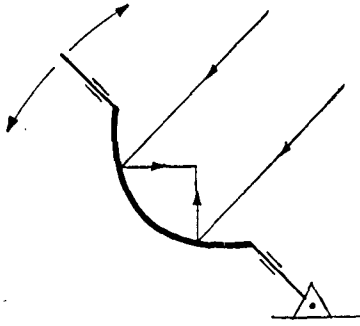
In tests, the aluminum reflector has withstood a static load of 95 lb per square foot. The accuracy of the surface can be further improved by the use of smaller size units; thus a 10-foot diameter reflector has been produced with a root mean square deviation of 0.003 inch and a maximum deviation over the surface of 0.009 inch.

### PLASTIC REFLECTORS

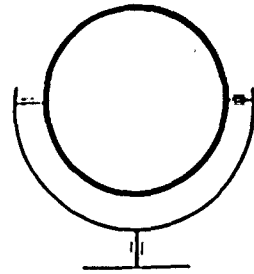
For some time it has been recognized that a liquid such as mercury forms an accurate paraboloidal reflector when it is spinning. Recently large paraboloidal reflectors have been spincast from plastic

\* Arthur D. Little, Inc., Cambridge, Massachusetts.

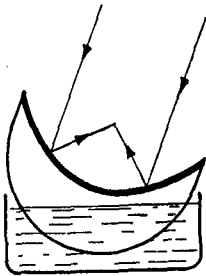




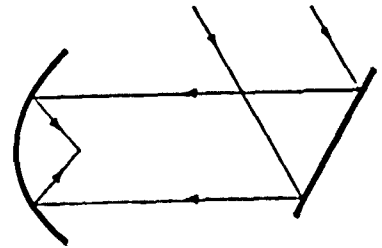
a. Simple paraboloid — altazimuth mounting



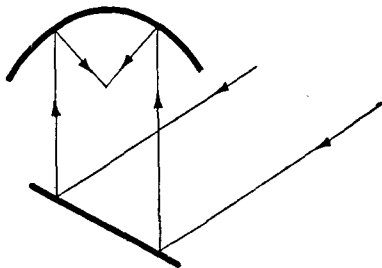
b. Simple paraboloid — equatorial mounting



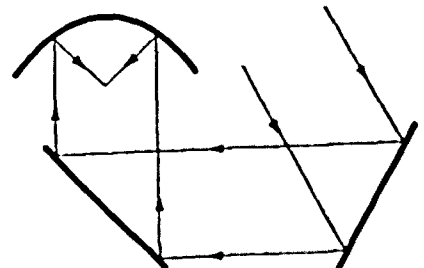
c. Simple paraboloid — floating mounting



d. Fixed paraboloid — heliostat



e. Fixed paraboloid — heliostat



f. Fixed paraboloid — fixed mirror — heliostat

Figure 1. Solar furnace configurations

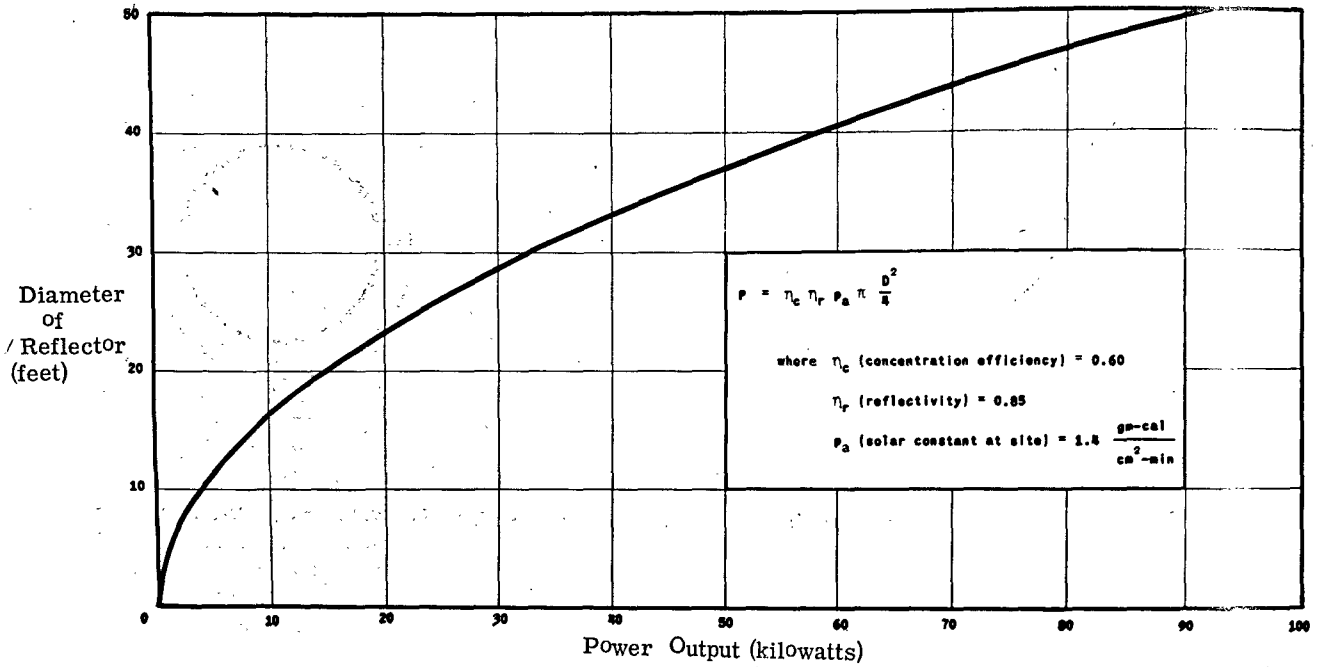


Figure 2. Potential output of solar furnaces

materials (see figure 4). The plastic is poured on a roughly paraboloidal understructure which is then rotated at a closely controlled speed so that an accurate paraboloid is formed. The plastic can then be taken off the mold and mounted on a suitable sup-

porting structure. One of the problems encountered with plastic mirrors of large size is that thermal expansion due to sudden temperature changes may crack the mirror surface.

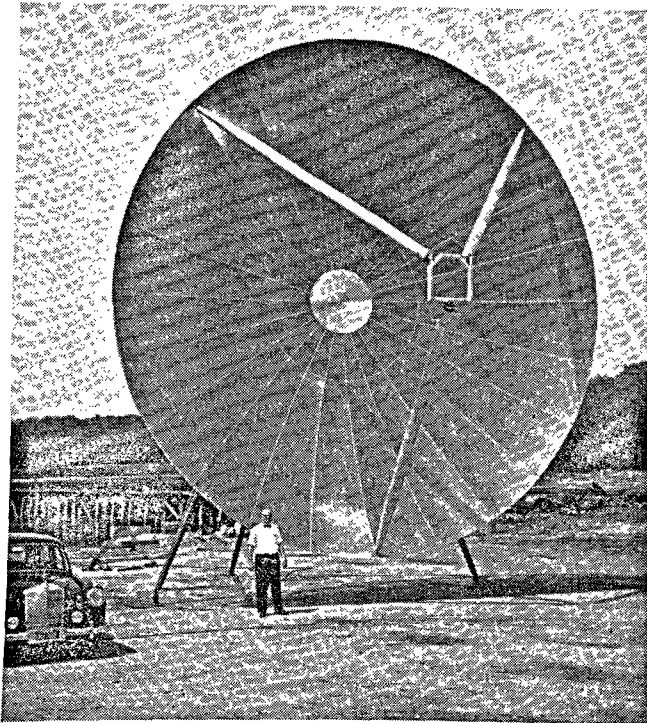


Figure 3. Aluminum reflector  
(Antenna Systems, Inc., Hingham, Massachusetts)

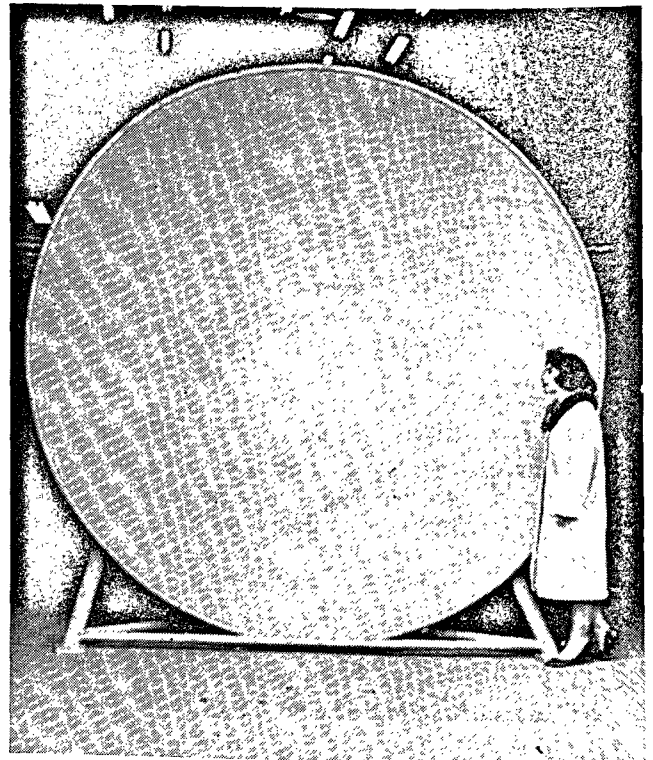


Figure 4. Spincast plastic reflector  
(D. S. Kennedy and Co., Cohasset, Massachusetts)

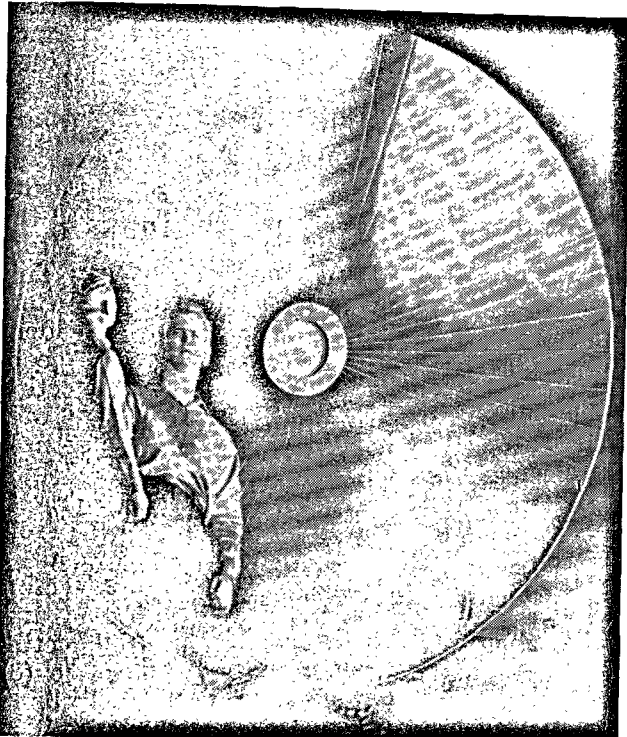


Figure 5. Aluminum coated Mylar, foamed plastic reflector (Goodyear Aircraft Corporation, Akron, Ohio)

Figure 5 shows a ten-foot diameter lightweight precision mirror, capable of being packaged. Aluminized Mylar is backed by a polyurethane foam to permanently rigidize the reflecting surface. The surface departs by less than  $\pm \frac{1}{8}$  of tangential error over 95 per cent of the total surface from the true paraboloid.

### Support structures

A conventional solar furnace having a reflector that follows the sun, as in figure 1a, or a fixed reflector and a heliostat, as in figure 1d, requires substantial structural supports and good foundations.

Although some of the support problems for the heliostat mirror can be reduced by use of multiple heliostats, the cost of the structures required increases.

One method for reducing the structural support of the mirror is shown in figure 6. A paraboloidal reflector is supported by a shell in the form of a spherical segment. If the shell is placed in a tank filled with sufficient fluid to cause the solar furnace to float, the reflector can be easily tilted. The size of the tank required for this purpose depends upon the buoyancy requirements of the complete furnace. Because such an installation can be placed near the ground, the effect of wind-loadings would be decreased and, in addition, wind-breaks could be provided to protect the installation from the prevailing winds.

With a lever system attached to the shell, the solar furnace could be made to follow the sun at a very small expenditure of power. A solar furnace of this design could incorporate one of the previously discussed light-weight reflector surfaces. It would not require a complicated installation; furthermore, it would be easily adaptable to different terrains.

### Efficiency requirements

#### COLLECTION OF SOLAR ENERGY

The development of new reflecting surfaces and supporting structures open up possibilities for the construction of large solar furnaces at more reasonable costs. The concentration efficiency of a solar furnace is directly influenced by the reflectivity of the mirror and the aperture of the paraboloid. The geometrical perfection of the reflector, which is a measure by which the reflector approaches the ideal paraboloidal shape, will further influence the heat flux available at the focal point (4).

The efficiency of the reflector is greatly influenced by the oxidation resistance of the reflecting surface and the potential deterioration due to fine dust particles. The thermal expansion of the reflector surface as a result of unconcentrated solar radiation may deform the surface from the ideal paraboloidal shape. Thermal expansion is of particular concern when large glass surfaces are used for the reflector. The large differential between day and night tem-

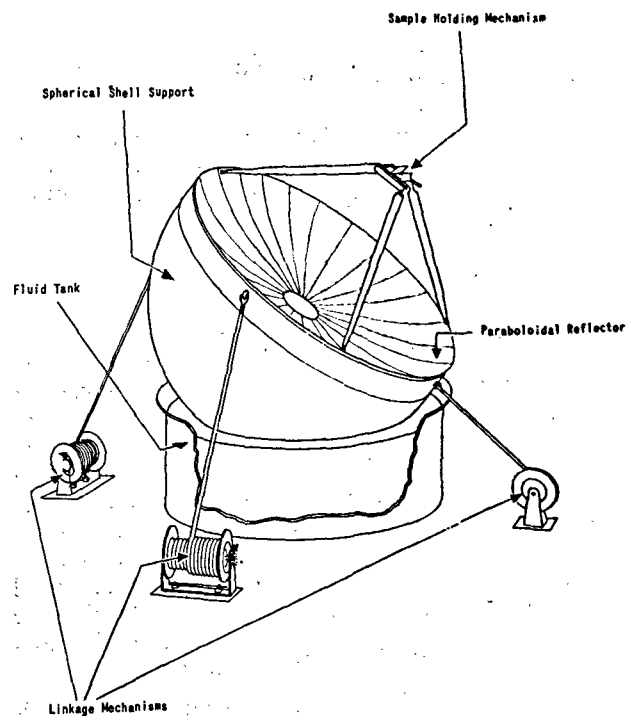


Figure 6. Floating support for solar furnace

peratures may cause thermal contraction of the supporting structure and stress the mirror elements out of shape.

#### UTILIZATION OF HEAT FLUX

The effectiveness with which materials can be heated in the focal zone of the reflector depends to a large extent on the reflectivity of the surface of the material and the heat losses from the surfaces that are receiving direct radiation. To increase the effectiveness, two approaches can be used.

(a) The material can be placed inside a cavity and the radiation concentrated within the cavity (5). The cavity itself can be insulated, provided that the temperatures do not rise above the limit of the refractory materials making up the cavity.

(b) For a continuous heating process in which the material is passed through the focal zone, the heat losses can be greatly reduced by effective thermal insulation of the material.

#### SUN TRACKING

For highest efficiency, the solar furnace must track the sun so that the optical axis of the reflector is constantly parallel to the rays of the sun. Considerable advances have been made in the tracking mechanism used for solar furnaces. Mechanisms with sensitive photo-cells have been used to track the sun with no attention from an operator (6). Semi-automatic tracking, in which the sun's orbit is followed by use of a clockwork mechanism but the declination is changed by hand each day, has been successfully accomplished.

#### Instrumentation

The utilization of solar furnaces has required the development of basic instruments to measure the temperature of the sample and the heat flux reaching the sample.

#### TEMPERATURE MEASUREMENT

In typical applications of the solar furnace, the temperature of a hot sample that is unenclosed and subject to sizable temperature gradients must be measured. Under these circumstances, radiation pyrometers cannot be routinely applied, since black-body conditions required for optical pyrometry are hardly ever obtained and thermal radiation properties of most test materials have not been accurately measured and those of others may even be unobtainable. The time-proven expedient of drilling a small cavity in the material to approximate black-body conditions can rarely be used, because of the non-isothermal conditions existing in the cavity.

An analysis of the theoretical accuracy obtainable with a total radiation pyrometer, a two-color pyro-

meter, and a disappearing filament-type optical pyrometer has shown that, when the sample emittance is known within 10 per cent, best results are obtained with a disappearing filament type pyrometer. Temperatures measured with this instrument are accurate to within 1 or 2 per cent (7).

A pyrometer cannot be directly used to measure the emitted radiation from the sample, because the emitted radiation would not be distinguished from the sun's radiation reflected from the sample. This difficulty can be overcome by the use of shutters that periodically shield the sample from the incident flux and at the same time permit the passage of emitted radiation from the sample to the detecting instrument (see figure 7). The shutter is made of a hollow cylindrical segment located near the sample and rotated so that the sample is periodically shielded from the sun's rays. When the shutter is directly in front of the sample, the radiation emitted from the sample is free to pass through the hollow shutter and the hollow conical support to the detecting instrument. Another shutter fastened to the same axis as the hollow segment shields the detecting instrument during the remainder of the cycle (8).

#### HEAT-FLUX MEASUREMENT AND CONTROL

The ability to control the heat flux reaching the sample and to measure both the flux distribution and the absolute heat flux is important to all solar furnace measurements. A variety of simple and accurate instruments for such measurements have been developed within the last few years.

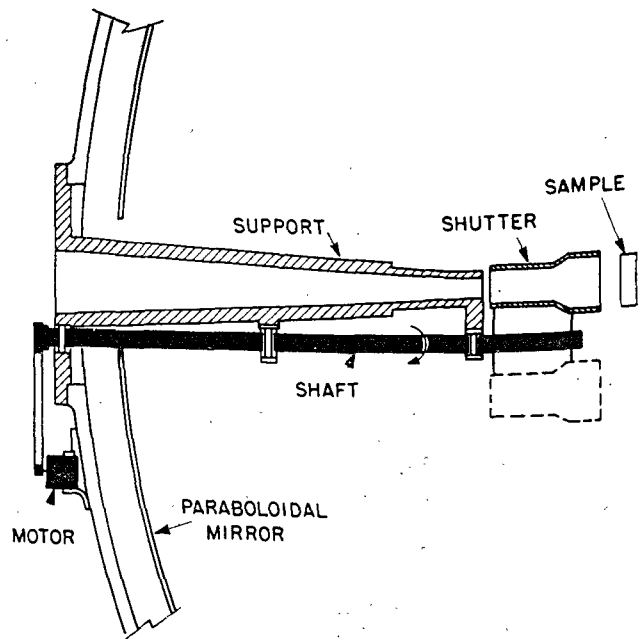


Figure 7. Shutters for separating emitted and incident radiation

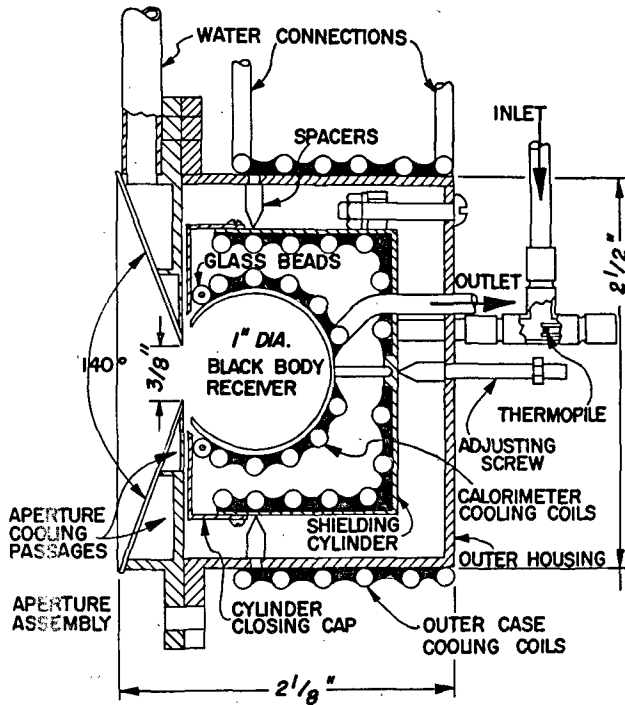


Figure 8. Absolute water-cooled calorimeter

#### Calorimeter

For measuring the absolute heat flux, a water-cooled calorimeter, shown in figure 8, has been developed (9). The incident radiation is accumulated within a cooled black-body cavity. The heat flux is calculated from the measurements of the water temperature rise, flow rate, and entrance aperture area. The instrument is absolute, because only a negligible fraction of the incident radiation escapes through the entrance aperture. The accuracy of the instrument is  $\pm 5$  per cent.

This type of calorimeter measures the average flux received over a specific area at the focal zone of a solar furnace.

#### Radiometer

In many instances, it is desirable to measure the flux distribution across the focal plane. The circular foil radiometer, shown in figure 9, has a receiving area of 0.006 sq cm and can be used for such measurements (10). A blackened circular foil of constantan fastened to a water-cooled copper support absorbs the incident radiation. A thin copper wire is spot welded to the center of the foil and the copper constantan thermocouple formed by these elements is used to measure the temperature of the center of the foil.

#### Shutters

The intensity of the radiant energy flux impinging on a sample at the focal zone of a solar furnace can be controlled and modulated by means of shutters. Cylindrical shutters have been widely used to modu-

late the intensity over a wide range of fluxes (11). Venetian-blind type shutters with a cam-actuated mechanism have been used to control the radiant energy flux to stimulate the effect of thermal pulses.

#### Flux redistributors

The spatial distribution of the radiant flux density across the focal zone is largely determined by the optical geometry of the paraboloidal reflector. Although it is usually desirable to control the concentration of radiant energy so that high temperatures are produced over a limited area, it may sometimes be more advantageous to obtain a uniform flux distribution across an enlarged image area. It has been shown that defocusing is not very useful because it is usually accompanied by a decrease in uniformity as the image size increases.

An alternative method is to use a device that can collect energy at the focal zone of the solar furnace and redistribute it over a large area. Flux redistributors have been used to provide a large number

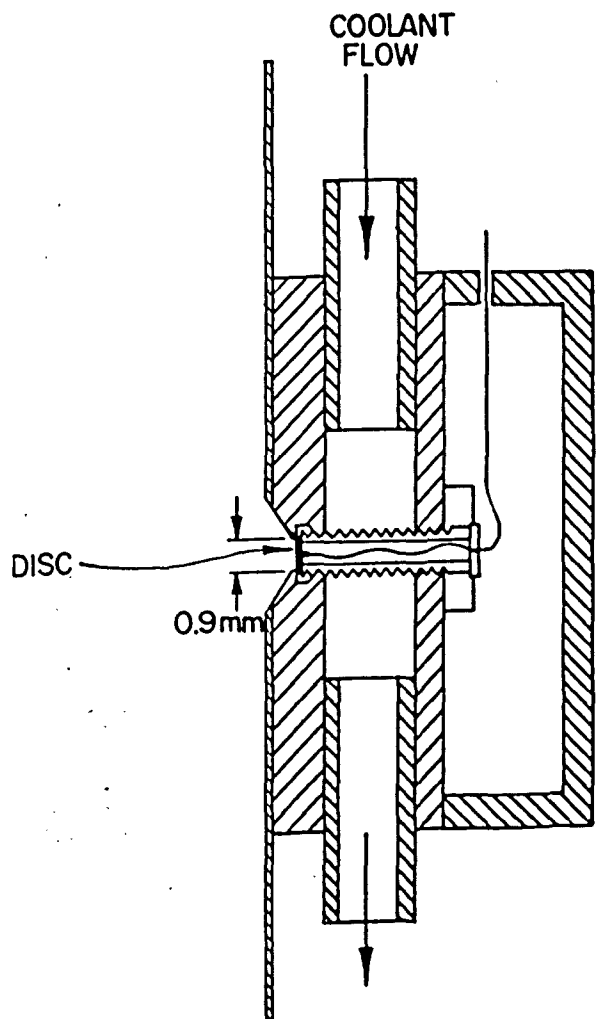


Figure 9. Circular foil radiometer

of reflections and help to distribute the flux uniformly.

Flux redistributors can have various cross-sections, although some cross-sections, such as those which are circular, are not suitable. The typical redistributor, shown in figure 10, is essentially a water-cooled pipe with a square hole. The four inside surfaces are made highly reflecting. The pipe is installed on the side of the focal plane away from the collecting mirror so that all of the radiation will fall into the square opening. Except for losses occurring in the reflection, the energy is reflected in such a way that it emerges at the far end of the pipe and irradiates the square area where the sample is located.

Figure 11 shows that an area  $B$  of the sample plane would be illuminated even if the light pipe were not used. With the light pipe,  $B$  is subdivided into many squares, each having the cross-sectional area  $A$  of the light pipe. These squares are super-

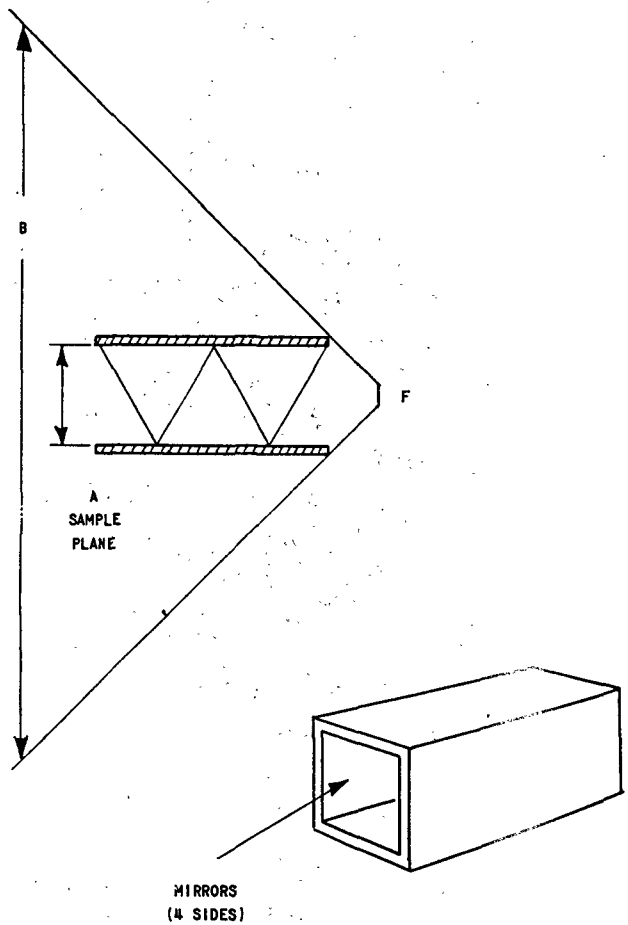


Figure 11. Function of flux redistributor

imposed on each other and form the total irradiance at the center square. Since each square contributes only a small portion of the total irradiance non-uniformities in the flux, the non-uniformities existing in individual squares do not have any significant effect.

Measurements of the flux with the radiometer have shown that with an aluminum-front-surfaced reflecting surface, flux uniformity to  $\pm 5$  per cent can be obtained over a 1-inch-square area in a 5-foot-diameter solar furnace.

### Experimental procedures

The availability of basic instruments for measuring temperature and heat flux has made possible a number of experiments designed to explore the high temperature behavior of materials. From these experiments, valuable data have been obtained which promise to lay the foundation for future industrial uses of solar furnaces.

### IMAGE CHAMBERS

One of the great advantages of thermal imaging is that materials can be exposed in a vacuum or any desired atmosphere. The image chamber shown

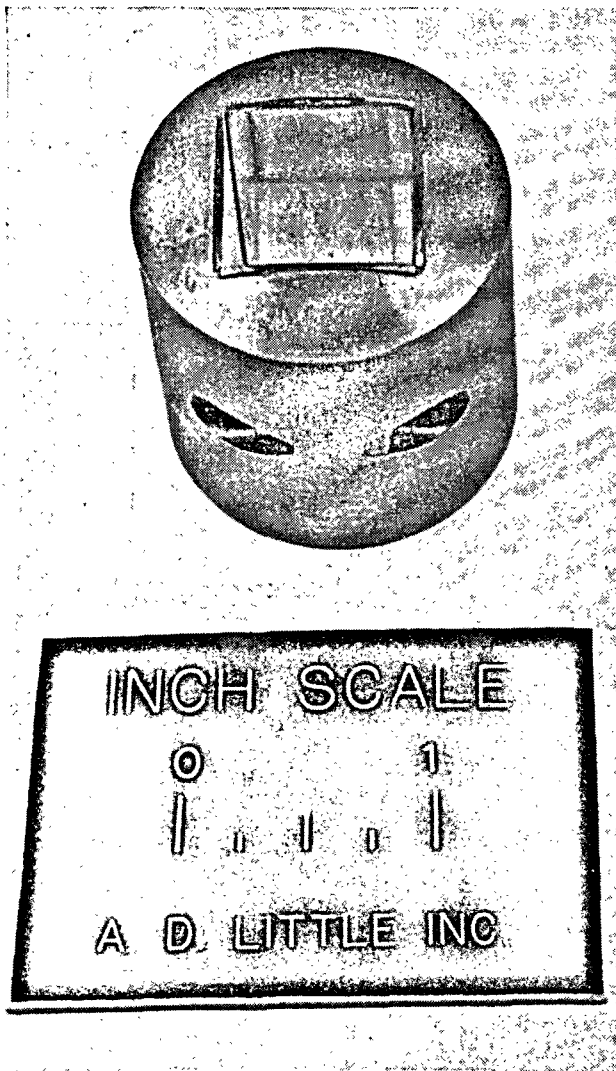


Figure 10. Flux redistributor

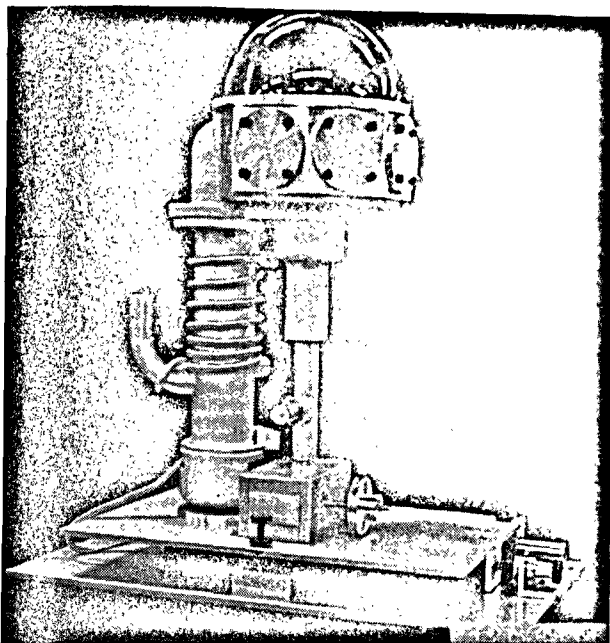


Figure 12. Evacuated or gas-filled image chamber

in figure 12 allows the environment of the sample to be controlled. The chamber is provided with a bell jar and is mounted on a vertical support. The sample stage can be rotated in the horizontal plane so that various portions of the sample can be brought into the focal zone. Access ports alongside of the image chamber allow water, gas and electric power to be brought into the sample.

One of the problems associated with the heating of materials in a vacuum is that vapors tend to condense on the bell jar and thereby reduce the radiant flux reaching the sample. Various methods have been suggested to overcome this problem. A rather ingenious approach uses a windshield wiper which periodically cleans the bell jar (12). When a gas is used inside the bell jar, vapors can be prevented from condensing on it if the gas is introduced at the top of the bell jar so that it streams down the sides.

The apparatus that is introduced into an image chamber can be of varied complexity. Figure 13 shows an apparatus devised for the study of pyrolysis products from heated materials. A movable sector positions a copper disk calorimeter that has a thermocouple attached to its back at the focal point and the total heat flux received over its area is measured. The sample is then rotated into position and exposed to the identical flux. The gases given off by the sample are drawn off and analyzed in a chromatograph or other suitable gas analyzers. A similar apparatus can be used to study the effects of various gases on a heated material. Thus, water vapor can be drawn across the sample and the resulting gases analyzed to obtain an indication of its reactions with water vapor at high temperatures.

## THERMAL PROPERTIES

The measurement of thermal properties of material at high temperatures has been particularly aided by the conditions existing in a solar furnace. Thus, high temperature calorimetry, thermal expansion, and thermal conductivity measurements have been made on materials. An example of the apparatus used for thermal conductivity measurement is shown in figure 14. In this apparatus, a small disk ( $3/8$ " diameter,  $1/8$ " thick) of the material is exposed to the heat flux. Measuring the temperature distribution across the boundaries of the disk and the heat flow through the back of the disk with the thermopile provides data from which the thermal conductivity can be computed.

The solar furnace has been used for the measurement of spectral emissivity of materials and to investigate the effect of thermal pulses on a number of materials. In addition, refractory materials have been exposed to examine the melting behavior, the surface tensions, and the effect of impurities.

## Industrial uses

The development of advanced designs for large solar furnaces, the availability of instrumentation, and the results of numerous experiments are setting the stage for the industrial use of solar furnaces.

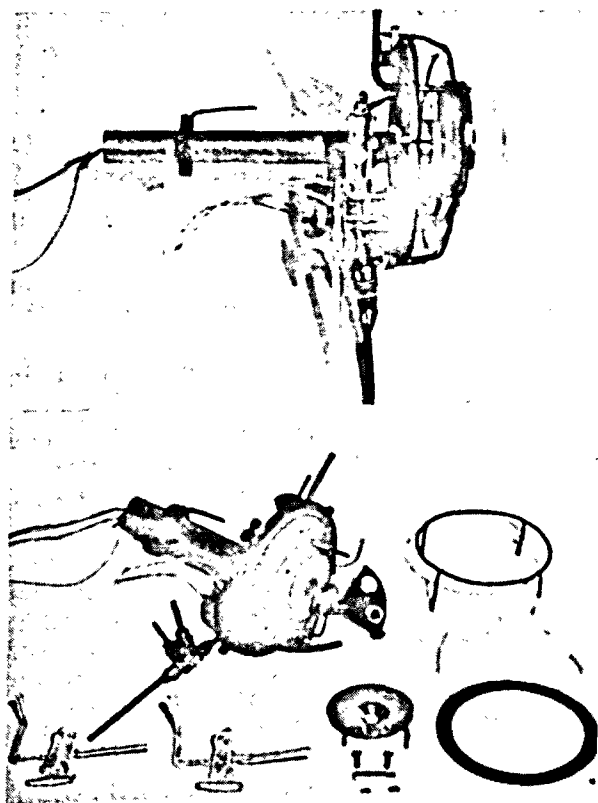


Figure 13. Apparatus for pyrolysis studies

The use of solar furnaces could become widespread if they can compete economically with more conventional methods of heating materials or if they can provide conditions not easily duplicated by other techniques. Solar furnaces have already been used for the processing of high temperature refractories in batches as large as 60 kilograms. By use of rotating cavity furnace, a high level of purification of refractory oxide has been achieved (2).

The power requirement associated with space travel has led to the development of thermoelectric and thermionic power conversion systems utilizing solar furnaces. In such systems, the solar radiation is focused on a heat receiver or photoemissive surface. The heat energy is then converted to electrical energy by a thermoelectric or a thermionic conversion system. Although these developments are still far from industrial uses, they promise an interesting future for solar energy applications. A number of heat engines have been constructed in which the heat from solar energy is transferred to a suitable working fluid which in turn drives a rotating turbine or a reciprocating engine that is coupled to an electric generator. These devices also are still in the laboratory stage. Their high efficiency may well make them interesting alternative sources of electric power.

Completely unexplored is the potential use of solar furnaces for chemical processes. Before solar furnaces can be used for the distillation of fluids, treatment of metals, gasification of oil-bearing shales and other chemical processes, more economic means must be found to concentrate solar energy on a large scale.

Interest in space exploration has led to an investigation of the possibility of using solar furnaces to obtain water from rocks such as those that are expected to be found on the moon. Such studies will no doubt provide fertile ideas for the industrial applications of solar furnaces.

Counterbalancing the very real advantages of using solar energy for industrial processes are the following problems:

- (a) Variable atmospheric conditions result in intermittent operations;
- (b) The use factor of the equipment is low, since it can be used only during the daylight hours;
- (c) Solar furnace sites have to be chosen for the weather advantages they offer.

At a suitable location, processing costs could be expected to be quite low. One study has shown that if the cost of treating a pound of material could be reduced by ten cents, the amortized payments could support a solar furnace cost of \$200 per square foot (13). Of course, additional charges would be incurred if the site of the solar furnace required that processing plants or materials be moved to a remote location.

Industry would look to solar energy only if it could be demonstrated that such power costs less than the conventional varieties. To be competitive, the cost of the reflector and its auxiliary equipment should not exceed \$2.00 per square foot. (This estimate is based on an equivalent cost of fuel for the energy delivered.) In many industrial processes extremely high temperatures and thus collectors of fine quality may not be required; therefore, some of the newer plastic material reflectors may permit costs to be reduced to about \$1.00 per square foot.

The specific future uses of solar energy in industry will depend upon the results of research now being conducted. Current investigations aimed at achieving a better understanding of the requirements for furnace construction, temperature generation and control, instrumentation, and component design should indicate the most promising applications. The small research solar furnace is already teaching us a great deal about the behavior of materials at high temperatures. This information will provide industry with an indication of the benefits that can be obtained through the use of solar energy.

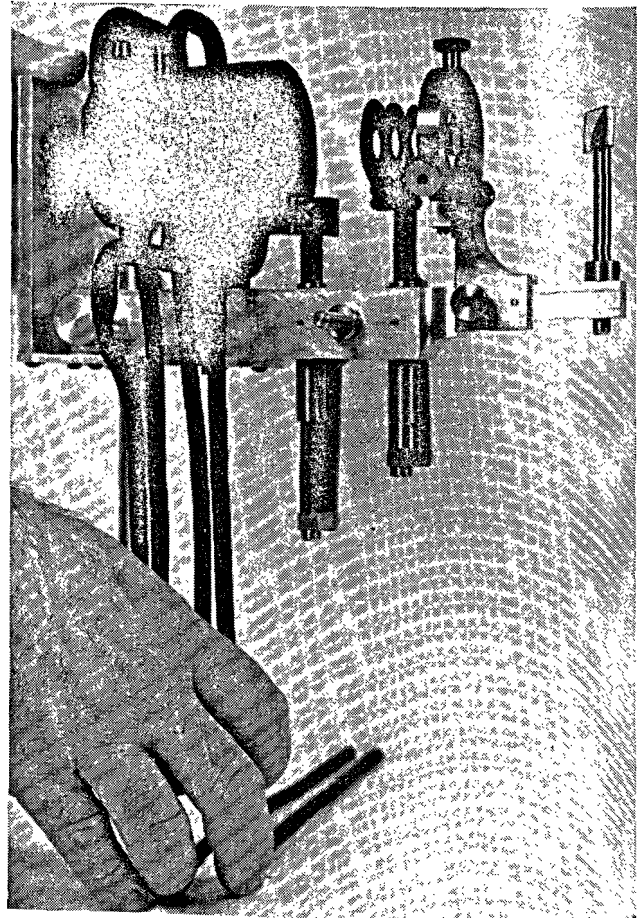


Figure 14. Thermal conductivity apparatus



## References

1. Symposium on Solar Furnaces, Phoenix, Arizona, January, 1957. *Journal of Solar Energy, Science and Engineering*, vol. I, April-July 1957.
2. Trombe, F., L'Utilisation de l'Énergie Solaire, État Actuel et Perspectives de l'Avenir, *Journal des Recherches du C.N.R.S.*, No. 25, December 1953.
3. Davies, J. M. and Cotton, E. S., Design of the Quartermaster Solar Furnace, *Journal of Solar Energy, Science and Engineering*, vol. I, Nos. 2-3, 1957, p. 16.
4. Hiester, N. K., Tietz, T. E. and Loh, E., Theoretical Considerations on Performance Characteristics of Solar Furnaces, *Jet Propulsion*, vol. 27, May 1957, p. 507.
5. Trombe, F. and Foëx, M., Techniques de Chauffage par Rayonnement, *La Chimie des Hautes Températures*, C.N.R.S., Paris, May 1954, p. 27.
6. Laszlo, T. S., de Dufour, W. F. and Erdell, J., A Guiding System for Solar Furnaces, *Journal of Solar Energy, Science and Engineering*, vol. II, No. 1 (1958), p. 18.
7. Emslie, A. G. and Blau, H. H., Jr., On The Measurement of the Temperatures of Unenclosed Objects by Radiation Methods, *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 106, No. 10 (1959), p. 877.
8. Glaser, P. E. and Blau, H. H., Jr., A New Technique for Measuring the Spectral Emissivity of Solids at High Temperatures, *Transactions, American Society of Mechanical Engineers*, Series C, vol. 81, February 1959, p. 92.
9. Glaser, P. E., High Radiation Flux, Absolute, Water-Flow Calorimeter, *Rev. Sci. Instr.*, vol. 28, December 1957, p. 1084.
10. Gardon, R., An Instrument for the Direct Measurement of Intense Thermal Radiation, *Rev. Sci. Instr.*, vol. 24, 1953, p. 366.
11. Conn, W. M., Gesichtspunkte für den Entwurf von Sonnen-Spiegelöfen für Hochtemperaturforschung und-Entwicklung, *Z.F. Angew. Physik*, vol. 6, No. 6 (1954), p. 284.
12. Laszlo, T. S., On Radiant Energy in High Temperature Research, Presented at Winter Annual Meeting, Amer. Soc. Mech. Engrs., New York, December 1960, paper No. 60-WA-170.
13. Edlin, F. E., Industrial Considerations of Solar Furnaces, *Journal of Solar Energy, Science and Engineering*, vol. I, April-July 1957, p. 52.

## Summary

In the past decade, interest in the use of solar energy has been spurred on by the increase in energy demands from all over the world due to the rapidly expanding populations. To meet these demands in the face of dwindling reserves of fossil fuels, devices capable of utilizing solar energy have been studied and developed. Among these devices, solar furnaces have received considerable attention.

The potential applications of solar furnaces to industrial processes that require high temperatures under controlled conditions has stimulated research in the fields of solar furnace design and construction, development of instruments, experimental investigations and process development.

Because solar energy is a very diffused form, it must be concentrated before its application is practical. Fundamental design problems associated with the construction of large paraboloidal reflectors and supports are of great practical significance for the economic usefulness of solar furnaces depends on their solution.

Glass reflectors used in the present large solar furnaces are assembled from many small mirrors, each of which is stressed so that its surface approaches that of a small section of a paraboloid. The cost of the glass mirrors and the requirements for rigid support structures have made such a design economically unattractive.

Aided by the requirements for long-range communication systems and the problems associated with power generation in outer space, aluminum and plastic reflectors have been developed. Thirty-foot-diameter aluminum paraboloidal reflectors have been

constructed at a fraction of the cost for glass reflecting surfaces. The aluminum has been shaped to the desired curvature by a draw-form process or by explosive forming.

The fabrication of large, accurately curved aluminum sheets which can then be assembled to form large paraboloidal reflectors is feasible. Spin casting of accurate paraboloidal reflectors has been perfected so that paraboloids of up to 28 feet have been produced. Some difficulties have been encountered because the thermal expansion of the plastic is different from that of the supporting structure and results in the cracking of the mirror surface.

In another approach which promises to overcome this problem, a reflective Mylar surface is applied over a foamed plastic which can be closely formed to the correct paraboloidal curvature.

Because of the light weight of the new reflector services, the design of structural supports and foundations can be approached from new directions. One method by which a minimum of structural support would be required is to provide the reflector with a spherical shell segment which is placed in a suitable container filled with sufficient fluid to float the whole assembly. A simple lever system attached to the outside shell controls the movement of the solar furnace.

The developments of new reflecting surfaces and supporting structures open up the possibility of constructing large solar furnaces at more reasonable costs. Although, for large solar furnaces, the efficiency of utilizing solar energy may not be the prime concern, every effort should be made to obtain the

greatest possible efficiency. The geometrical perfection of the reflector and the effects of oxidation and erosion of the reflecting surface must be taken into account. The utilization of all available heat flux requires that the material or process be arranged to limit the losses from heated surfaces due to reflection and to re-emission from surfaces not receiving radiation. Cavity heating and effective thermal insulation can greatly reduce unwanted heat losses. Accurate sun tracking has been developed so that no loss in efficiency need result, and the optical axis of the reflector can be kept continually parallel to the rays of the sun.

The development of instruments for measuring temperature and heat flux have greatly aided the experimental investigations in which solar furnaces are used. Temperature measuring instruments, utilizing shutters to separate the radiation emitted by the sample from the radiation reflected from the surface of the sample, permit the use of optical pyrometers. Absolute water-cooled calorimeters for measuring the total heat flux and radiometers for measuring the flux distribution across the sample area allow the heat flux reaching the sample to be controlled. Cylindrical shutters and venetian blind-type shutters have been used to control the quantity of radiant energy reaching the sample. A flux redistributor has been developed which collects the energy at the focal zone of the solar furnace and redistributes it over a larger area than would appear possible according to the spatial distribution of the radiant flux density determined from the optical geometry.

Considerable advances have been made in carrying out experiments to measure the high temperature

behavior of materials. A number of image chambers have been constructed that permit the material to be exposed in a vacuum or in any desired atmosphere. Apparatus for the measurement of thermal properties, chemical properties, and study of the high temperature behavior of materials have been constructed and valuable data have been obtained.

The development of advanced designs for constructing large solar furnaces, the availability of instrumentation and the results of numerous experiments are setting the stage for the industrial uses of solar furnaces. Some of these industrial uses have already become reality, e.g. the treatment of batches of refractory materials to achieve higher levels of purification.

Counterbalancing the very real advantages of using solar energy for industrial processes are several difficulties:

(a) Variable atmospheric conditions may result in intermittent operations;

(b) Equipment can be used only during the daylight hours;

(c) Suitable weather conditions determine the location of solar furnace sites.

As the cost of reflectors and auxiliary equipment is further reduced, industry will become increasingly interested in applying solar furnaces. Current investigations which are aimed at achieving a better understanding of the requirements for furnace construction, temperature generation, and control, instrumentation and component design should indicate the most promising applications.

## LES APPLICATIONS INDUSTRIELLES : UN DÉFI AUX CHERCHEURS QUI SE CONSACRENT AUX FOURS SOLAIRES

### Résumé

L'intérêt qui se manifeste depuis ces dix dernières années vis-à-vis des utilisations de l'énergie solaire a été stimulé par l'augmentation des exigences d'énergie du monde entier à la suite du développement rapide de la population. Devant ces exigences et l'épuisement progressif des réserves de combustibles fossiles, on a mis à l'étude et réalisé certains dispositifs capables de faire usage de l'énergie solaire. Parmi ces dispositifs, les fours solaires ont fait l'objet d'une attention toute particulière.

Les applications possibles des fours solaires aux procédés industriels qui exigent des températures élevées dans des conditions contrôlées sont venues stimuler les chercheurs dans les domaines de la réalisation et de la construction de fours solaires, ainsi que dans ceux de la mise au point des instruments, des recherches expérimentales et du développement des procédés.

L'énergie solaire se présentant sous une forme très diffuse, il faut la concentrer avant que son application puisse être pratique. Les problèmes fondamentaux de conception auxquels on se heurte dans la construction de réflecteurs paraboliques de grandes dimensions et de leurs supports présentent une importance pratique considérable, car c'est de la manière dont ils sont résolus que dépend la valeur économique du four solaire.

Les réflecteurs en verre utilisés dans les fours solaires de grandes dimensions actuels sont réalisés par l'assemblage d'un grand nombre de petits miroirs élémentaires dont chacun est déformé de telle sorte que sa surface épouse celle d'un élément de paraboloïde. Le coût des miroirs en verre et les exigences relatives aux structures de soutien rigides qu'il faut leur adjoindre ont rendu cette formule peu attrayante du point de vue économique.

Sous l'impulsion des exigences ayant trait à des systèmes de télécommunications à grande portée et des problèmes dont s'accompagne le besoin de produire de l'énergie dans l'espace interplanétaire, on a mis au point des réflecteurs en aluminium et en composition plastique. On a construit des réflecteurs de forme parabolique de trente pieds (9,1 m) de diamètre en aluminium pour une fraction seulement du prix des surfaces réfléchissantes en verre. On a donné la courbure voulue à l'aluminium par étirage ou déformation explosive.

Il est possible de fabriquer de grandes feuilles d'aluminium formées en courbes précises que l'on assemble ensuite de manière à constituer de gros réflecteurs paraboliques. On a perfectionné la coulée avec centrifugeage de tels réflecteurs paraboliques au point de pouvoir produire de semblables surfaces ayant jusqu'à 28 pieds (8,4 m) de diamètre. On s'est heurté à certaines difficultés dues au fait que la dilatation thermique de la matière plastique est différente de celle de la structure de soutien, ce qui provoque des fêlures de la surface du miroir.

Dans le cadre d'une méthode qui promet de surmonter ce problème, on envisage l'application d'une surface réfléchissante en Mylar sur un plastique poreux que l'on peut conformer sensiblement à la courbure exacte du parabolique.

Les nouveaux réflecteurs étant particulièrement légers, on peut s'attaquer à la réalisation des structures de soutien et des fondations d'une manière entièrement inédite. Une méthode avec laquelle il suffirait d'un minimum de soutien structurel consiste à doter le réflecteur d'une calotte sphérique lui servant de coquille, que l'on met alors dans un récipient approprié rempli d'une quantité de liquide suffisante pour que l'ensemble puisse flotter. Un jeu simple de leviers, montés sur la coquille extérieure, permet de régler à volonté les mouvements du four solaire.

La mise au point de surfaces réfléchissantes et de structures de soutien d'un nouveau genre permet de former de nouveaux espoirs quant à la possibilité de construire des fours solaires de grandes dimensions à des prix plus raisonnables. Bien que le rendement de l'utilisation de l'énergie solaire ne soit pas la première considération pour les fours solaires de grandes dimensions, on ne devra rien négliger pour qu'il soit aussi élevé que possible. On doit tenir compte de la perfection géométrique du réflecteur et des effets de l'oxydation et de l'érosion sur la surface réfléchissante. L'utilisation de la totalité du flux de chaleur disponible exige que les matériaux ou le procédé soient organisés de manière à limiter les pertes, aux surfaces chauffées, par la réflexion et par la ré-émission de la zone qui ne reçoit pas de rayonnement. Le chauffage des cavités et l'emploi d'un calorifugeage efficace peut fortement réduire les pertes de chaleur. On a mis au point des dispositifs permettant de suivre très exactement le soleil, si bien qu'il n'y a pas de pertes de débit et que l'axe optique du réflecteur peut être maintenu en parallélisme constant avec les rayons du soleil.

La mise au point d'instruments servant à mesurer la température et le flux thermique a beaucoup aidé les recherches expérimentales dans lesquelles il est fait usage de fours solaires. Des instruments thermométriques, qui font usage d'obturateurs pour séparer le rayonnement émis par l'échantillon de celui qui est réfléchi de la surface de celui-ci, permettent l'emploi de pyromètres optiques. L'emploi de calorimètres absolus à refroidissement par l'eau pour la mesure de la totalité du flux de chaleur et de radiomètres pour la mesure de la répartition du flux sur la largeur de l'aire de l'échantillon permettent de régler le flux de chaleur qui parvient à cet échantillon. On a fait usage d'obturateurs cylindriques et du genre à jalousies pour régler la quantité de chaleur qui parvient à cet échantillon. Un redistributeur du flux a été mis au point : il recueille l'énergie dans la zone du foyer du four solaire et la redistribue sur une surface plus étendue qu'il ne semblerait possible d'après la répartition spatiale de la densité du flux rayonnant conditionnée par la géométrie du système optique.

On a réalisé de gros progrès dans l'exécution d'expériences servant à mesurer le comportement des matériaux aux températures élevées. On a réalisé un grand nombre de chambres d'image, qui permettent que le matériau soit exposé dans le vide ou dans toute atmosphère voulue. On a construit un appareillage pour la mesure des propriétés thermiques et chimiques, ainsi que pour l'étude du comportement des matériaux aux températures élevées. Tout ceci a permis de recueillir des renseignements précieux.

La mise au point de conceptions modernes pour la construction de fours solaires de grandes dimensions, la disponibilité d'instruments appropriés et les résultats de nombre d'expériences préparent l'avènement de l'utilisation du four solaire à des fins industrielles. Certaines de ces applications sont déjà du domaine de la réalité, notamment le traitement thermique de lots de matériaux réfractaires dans le but de réaliser de plus hauts niveaux de purification qu'auparavant.

En contrepartie des avantages très réels des emplois de l'énergie solaire pour les procédés industriels, citons plusieurs difficultés :

- a) Les variations de l'état atmosphérique peuvent provoquer des intermittences de fonctionnement;
- b) On ne peut se servir du matériel que pendant les heures de jour;
- c) Les servitudes climatologiques déterminent l'emplacement des fours solaires.

Avec de nouvelles réductions des prix des réflecteurs et de ceux du matériel auxiliaire, l'industrie s'intéressera de plus en plus aux applications des fours solaires. Les recherches en cours, visant à se faire une idée plus exacte des exigences ayant trait à la construction des fours, à l'établissement de températures élevées, aux instruments nécessaires et à la conception des éléments constitutifs de ces appareils, doivent indiquer celles des applications possibles qui seront les plus fructueuses.

## NEW TECHNIQUES AND POSSIBILITIES IN SOLAR FURNACES

*Tibor S. Laszlo* \*

Solar furnaces are very suitable for high temperature experimentation and measurements (1). For successful operation, however, it is important to take into consideration the unusual heating conditions which exist at the focal area. These conditions place certain limitations on experimentation in a solar furnace. For successful operation, therefore, it is necessary to develop special equipment as well as special methods which take into consideration these limitations. In some cases, it is possible to adapt conventional experimental techniques to the restrictions in the furnace; in others a completely new approach to the problem must be found.

Three details require consideration when experiments are planned for a solar furnace. The first is the small size of the hot zone. A larger image size may be obtained by increasing the reflector of a solar furnace. However, the technical problems involved in the building and operation of a large solar furnace are considerable. In addition, it is not possible to manufacture a large paraboloid reflector, especially one composed of several plane or spherical mirrors, with the same high precision as for a smaller sized paraboloid. As a consequence, the concentrated heat flux in a large solar furnace is usually much lower than it is in a small one. It appears that a better solution to this problem is to change experimental techniques so as to make use of a small image size. The precision of the measurements is not necessarily affected by the reduction of the size of the heated portion of a sample. If the analogy in the development of micro-analysis can be applied here, the decrease in sample size may even increase the accuracy of certain tests.

The second limitation, namely, that heating takes place only on one side of the sample is more restrictive. Heating in a cavity has been suggested (2) to overcome this difficulty. It appears, however, that the refractoriness of the cavity material sets a rather low temperature limit on such a technique. In addition, owing to the presence of the sample in the cavity, it is unlikely that a uniform wall temperature can be reached. With this technique, there is also the danger that the proximity of the hot cavity wall may contaminate the sample, thus depriving the solar furnace of one of its most important operational advantages. A more promising technique is the rotation of the sample around an axis perpendicular

to the optical axis of the furnace, in order to achieve even heating around the entire circumference.

The third restrictive property, the non-uniform flux across the image area, requires the most serious consideration. Two approaches were explored to overcome this difficulty. The first approach was to employ additional optical elements in the solar furnace in order to decrease or perhaps totally eliminate flux differences. The other approach uses an experimental technique, which, together with a newly developed analytical procedure, permits the calculation of the temperature dependence of a property measured in the non-uniform flux area.

### The sample holders

In order to overcome the one-sided heating of a sample, special sample holders have been designed. The first such sample holder is shown schematically in figure 1. The cylindrical enclosure, made of an asbestos-cement composite, is topped by a transparent hemisphere. An oscillating wiper blade scrapes deposits off the inside of the hemisphere. The wiper blade is made of steel, tailored to the shape of the hemisphere, and covered with a woven silica fiber sleeving. Generally, a borosilicate hemisphere cut from a one liter laboratory round bottom flask can be used. When the highest obtainable fluxes are required, a 96 per cent silica content glass or pure silica hemisphere is recommended. The sample can be rotated at variable speed around the optical axis of the furnace in order to obtain symmetrical heating. Gas inlet and outlet connections, for use under vacuum or controlled atmospheres, are located at the base plate. The method of mounting the hemisphere is illustrated in figure 2. A refractory ring surrounds the hemisphere and presses it to the cylinder; the ring itself is tied down by bolts to the base plate. The nuts for the bolts are spring-loaded in order to avoid failure due to differential thermal expansion. A photograph of the completed sample holder is shown in figure 3.

Several samples were heated in this sample holder with a 60-inch solar furnace. Figure 4 shows part of a molten crater of an alumina sample. The molten portion is well defined and has a sharp rim produced by quenching the sample. Incipient radial crystal growth is visible at the rim. Specks of impurities are concentrated on the unmelted portion of the alumina. Figure 5 is a cross section through the paraboloidal crater formed by fast spinning of the molten alumina.

\* Research and Advanced Development Division, Avco Corporation, Wilmington, Massachusetts.

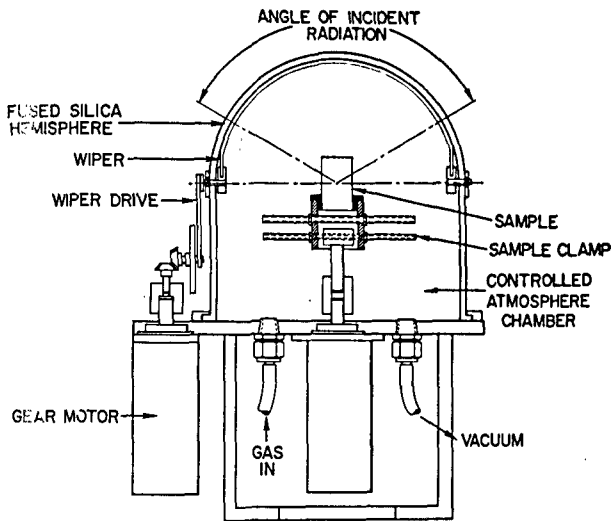


Figure 1. Controlled atmosphere sample holder with wiper

The voids below the surface were formed during the cooling, crystallization process. Figure 6 shows cube-shaped single crystals grown in the voids below the surface. Figure 7 is the photomicrograph of another alumina crater which was heated for a longer period of time and cooled off slowly by moving the flux control cylinder in small steps. This explains the formation of concentric rings. The hole in the center completes the phonograph record-like appearance. The large voids are due to shrinkage during the crystallization of the molten alumina. Figure 8 shows the crater of a zirconia sample. On the fused surface, concentric rings formed by decreasing the image size step by step are visible. In figure 9 the sharp definition of the hot zone is demonstrated. The fused crater is surrounded by the original, unmelted porous structure. Figure 10 is a cross section of the zirconia crater. At the surface, a thin,

well defined layer, formed during the fast quenching, is visible. Underneath, the cooling was slower; and, as a result, somewhat larger and well defined crystals developed. Figure 11 is a full view of the alumina sample shown partially in Figure 7. The impurities, having a lower melting point and higher vapor pressure than alumina, diffused away from the hot zone and concentrated, forming a dark circle at the cooler portion of the sample. The color of the unmelted portion adjoining the crater is much lighter than that of the original sample, indicating a decrease in impurities. This effect can be utilized for zone refining of solids in a solar furnace.

A second sample holder was designed for the rotation of the sample around an axis perpendicular to the optical axis of the furnace (figure 12) in order to achieve even heating around the entire circumference. The sample holder clamps are mounted in ball bearings. One of the clamps is driven by a servomotor through a gear train; the other rotates freely. Both clamps are water-cooled, the water being fed and drained through rotating sealed glands. The rest of the design, including the wiper attachment, is

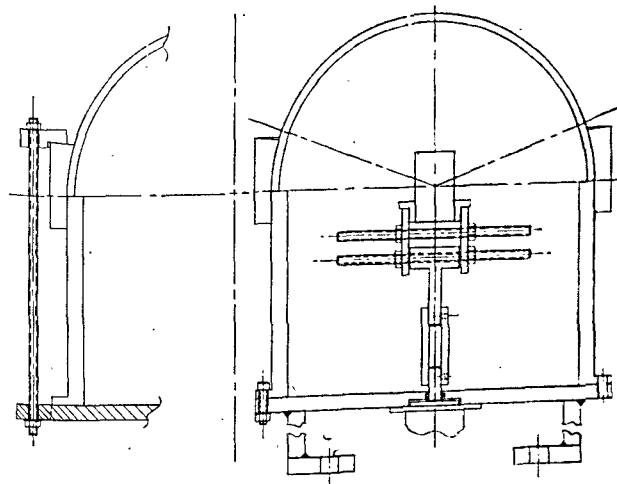


Figure 2. Transparent hemisphere mounting

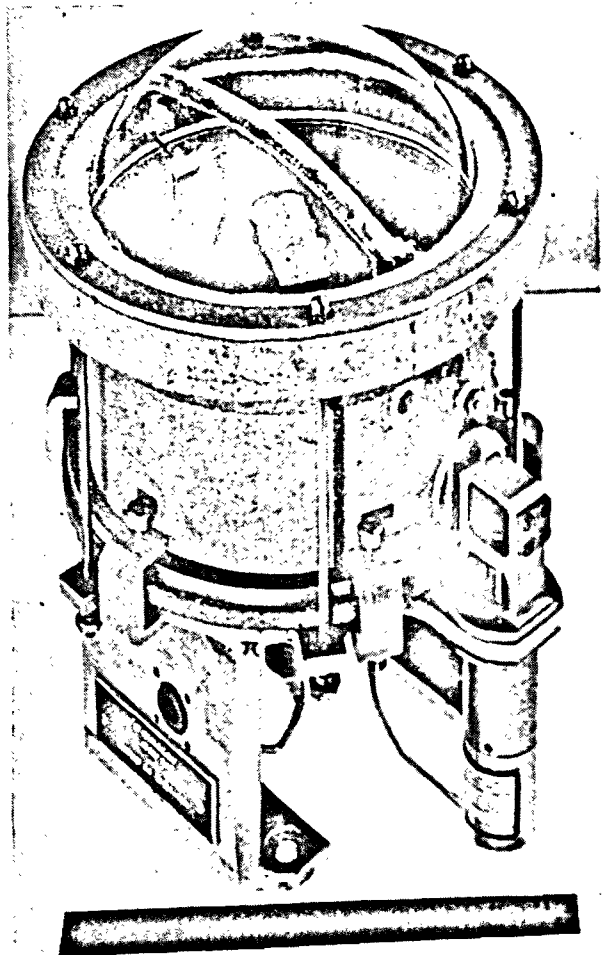


Figure 3. Controlled atmosphere sample holder



Figure 4. Edge of alumina crater (23x)

identical with that in figure 1. This sample holder provides good contacts for the measurement of electrical properties. Further, this sample holder permits the application of a new experimental technique developed to overcome the third operating

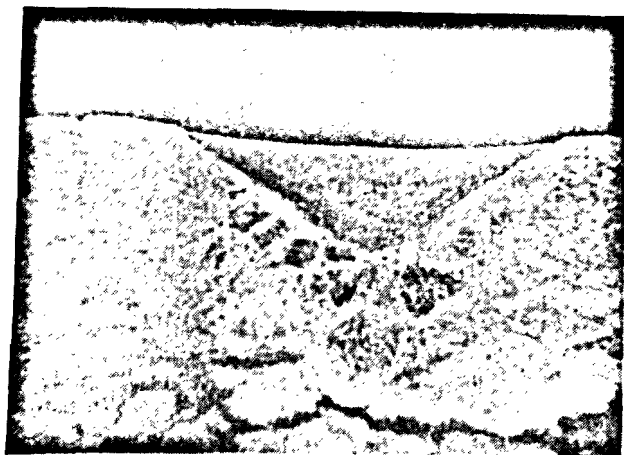


Figure 5. Cross section of alumina crater (14x)

restriction, the uneven flux distribution in the image area.

In the direct measurement of a property, it is only possible to obtain one effective value for the entire temperature range of the solar image. This range may reach from ambient temperature at the periphery to 3000-3500°C at the center of the image. Thus, the directly measured value of any property (e.g., electrical resistivity, thermal expansion, etc.) has little, if any, definitive meaning. If, however, the same measurement is also performed at a different temperature level, information may be obtained on the temperature dependence of the measured property.

The experimental part of this method requires the accurate determination of the temperature distribution across the sample for each measurement at a different maximum temperature level. Further, it is also important that the temperature at the periphery of the sample be kept constant and close to ambient. This can be accomplished by the use of the water-cooled clamps. The details of this method, together with its mathematical apparatus, have been published elsewhere (3).



Figure 6. Single crystals grown below the crater surface (58x)

## Flux measurements

The high heat fluxes encountered in image furnaces are usually measured with calorimeters or radiometers calibrated with calorimeters. Several water-cooled calorimeters have been designed which are suitable for use in image furnaces (4). These calorimeters employ a spherical cavity as an artificial blackbody to absorb the incident radiation.

The problem of finding the optimum shape for an artificial blackbody has been investigated extensively. Buckley (5) studied the radiation from the inside of a circular cylinder. He derived an expression for the radiation from an annulus to any other annulus in a cylinder of infinite length taking into account multiple reflections. He then applied the same method to the case of a finite, uniformly heated cylinder and obtained an approximate solution. Finally, he adapted the method to the problem of a uniformly heated finite cylinder closed at one end—a shape which closely approximates some artificial blackbodies used in optical pyrometry.

One of the most interesting results of his work is the relationship between cylinder length and orifice radius. It is shown that if the emissivity of the cylinder wall is 0.75, a cylinder length/orifice radius ratio

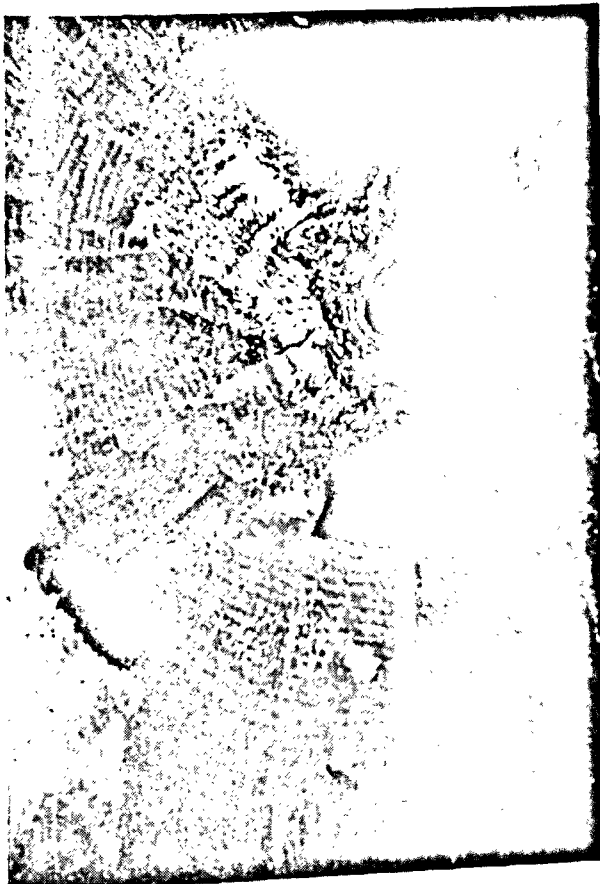


Figure 7. Slowly cooled alumina crater (37x)

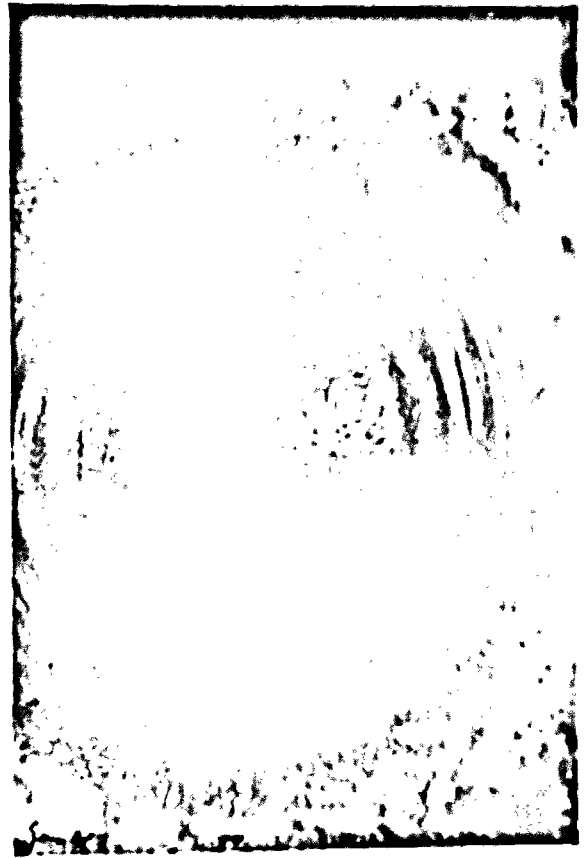


Figure 8. Zirconia crater (14x)

of 3.8 gives radiation intensities within 1 per cent of blackbody radiation. This ratio decreases rapidly as the emissivity of the wall increases, with the result that, for materials of high emissivity, the length of the cavity can be greatly reduced without reducing the orifice radius as well.

Gouffé compared the sphere, the cylinder and the cone in his search for the optimum artificial blackbody shape (6). He based his comparison on the value  $L/R$ , where  $L$  is the length of the blackbody cavity and  $R$  is the radius of its orifice. From these data, he calculated the total surface area of the cavity  $S$  and the surface area of the orifice  $s$ . The ratio  $s/S$  then expressed the relative value of the cavity as a radiant energy trap. It should be pointed out that in his calculation  $S$  includes the area of the orifice  $s$ , which is not an absorbing surface. A more correct expression for the evaluation of the cavity would be  $s/S_1$ . The shapes considered by Gouffé are shown in figure 12 (a), (b), (c).

The author devised a new shape for artificial blackbodies, consisting of a truncated right cone with the smaller end as the orifice. The bottom of the cavity is a right circular cone (figure 13 (d)). In a cavity of this shape, only a very small fraction of the total area "sees" the orifice perpendicularly and accordingly losses due to irradiation are low.

Table 1. Comparison of artificial blackbody shapes

$\frac{L}{R}$	$\frac{s}{S}$			Double cone**	$\frac{s}{S} - \frac{s}{S_0}$		#
	Sphere*	Cylinder*	Cone*		Cylinder*	Cone*	
1. . . . .	0.500	0.250	0.415	0.175	- 0.250	- 0.085	- 0.325
2. . . . .	0.200	0.167	0.309	0.094	- 0.033	+ 0.109	- 0.106
3. . . . .	0.100	0.125	0.241	0.059	+ 0.025	+ 0.141	- 0.041
4. . . . .	0.059	0.100	0.195	0.041	+ 0.041	+ 0.136	- 0.018
5. . . . .	0.039	0.083	0.164	0.030	+ 0.044	+ 0.125	- 0.009
8. . . . .	0.016	0.058	0.111	0.015	+ 0.040	+ 0.095	- 0.001

\* Shapes considered by Gouffé.

\*\* Shape proposed by present investigation.

# Comparison of shapes with sphere ( $s/S_0$ ).

Gouffé's method of evaluation has been applied to this shape. The results, together with Gouffé's data for the shapes he has considered are presented in table 1.

From the table it can be seen that if the  $L/R$  ratio is greater than 2, both the cylinder and the cone are inferior to the sphere as indicated by the  $s/S$  value. The double cone shape, however, results in a  $s/S$  value which is more favorable than that for the sphere even for  $L/R$  ratios as high as 8. Such a high

$L/R$  ratio is required only if the emissivity of the wall is as low as 0.25, an unlikely choice indeed for the cavity material.

The  $s/S$  ratio, however, does not perfectly express how closely a cavity approximates the radiation characteristics of a blackbody. The effect of multiple reflections must be considered in order to determine what fraction of the radiation entering the cavity

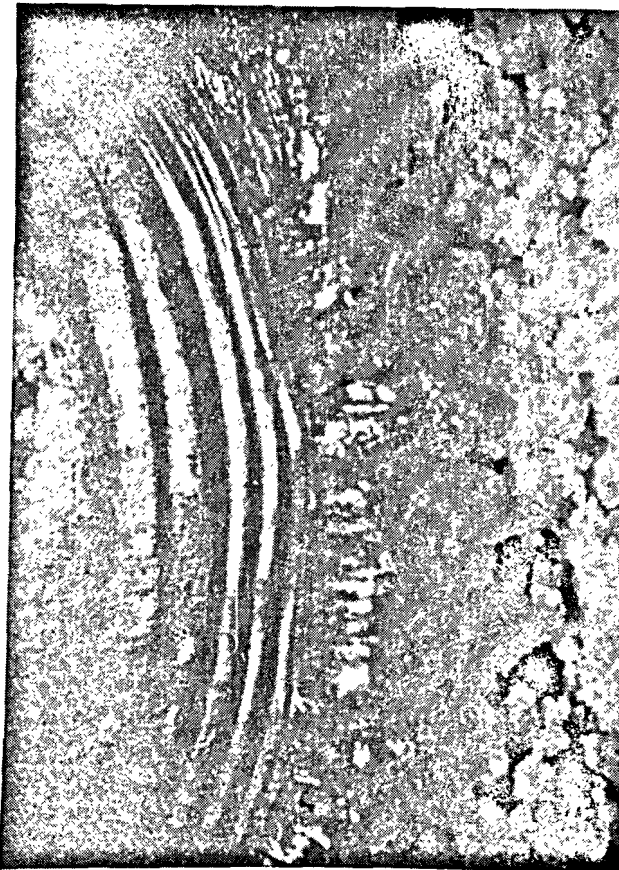


Figure 9. Edge of zirconia crater (37x)

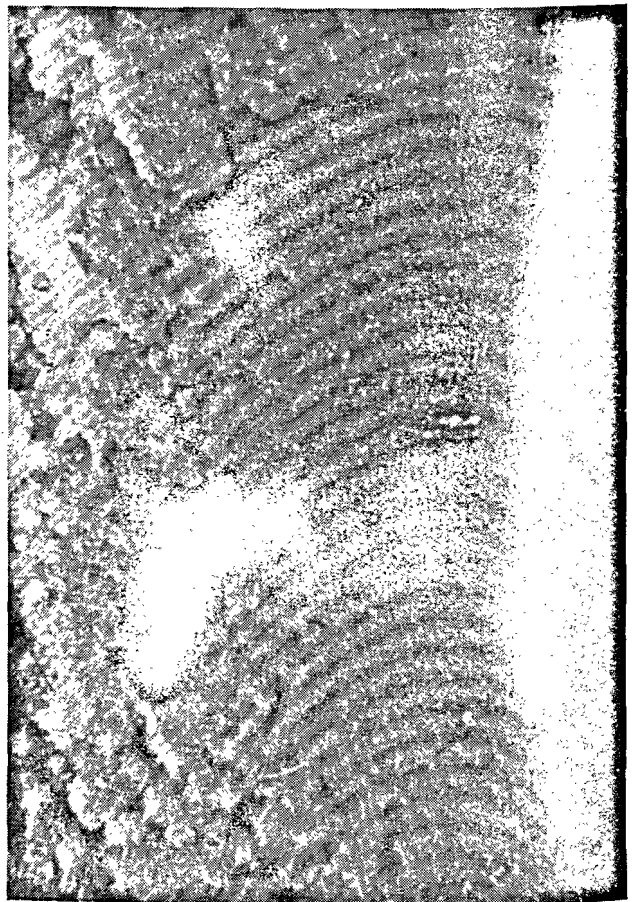


Figure 10. Zirconia crystals below the crater surface (58x)



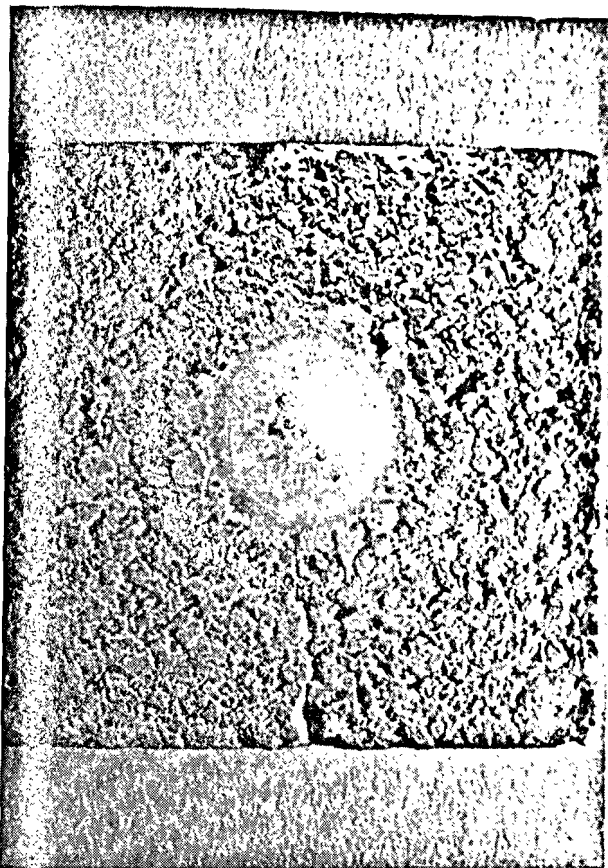


Figure 11. Zone effect of alumina crater (24x)

will, after many reflections from its walls, escape from it. An integral equation has been developed which considers every point of the double-cone-shaped cavity as a receiver and emitter of radiation. This analytical expression will be programmed for a high speed computer in such a manner as to calculate the effect of multiple reflections on a known flux entering the cavity and as a result obtain the fraction which escapes from the cavity. The validity of the analytical expression will be tested by assuming that the reflectivity of the cavity wall is unity. In this case, the flux escaping from the cavity should be equal to the flux entering it, thus providing an analytical check on the formulation and subsequent programming of the problem. Once the calculating program has been proved correct, it will become possible to optimize the shape of the proposed blackbody by selecting cone angles and length/radius ratios which trap the largest fraction of the incident radiant energy.

### Calorimetry

A water-cooled calorimeter has been constructed with an absorbing cavity of the proposed new shape. The calorimeter is designed to be mounted in the focal area of the solar furnace while the concentrated

radiant energy is permitted to enter through a well-defined orifice. The radiant energy is absorbed by the cavity walls, and the heat thus generated is transmitted to distilled water passing through the water-jacket of the cavity at a controlled and measured rate of flow. The resultant rise of the temperature of the water is measured with differential thermopiles. The normal incidence solar radiation is measured concurrently. From these data, the radiant energy flux per unit normal incidence solar radiation is calculated.

Using this method, numerous flux measurements have been made in a 60-inch diameter solar furnace at different attenuator positions. The results of these measurements are presented in table 2. Average flux values have been calculated from these measurements and plotted against the flux attenuator positions. This correlation is presented in figure 14. The average deviation for these values is approximately 3.7 per cent. The highest average flux for the entire focal area measured to date is 321 cal/cm<sup>2</sup> sec at a normal incidence solar radiation of 1.34 Ly/min. Based on these measurements, it was calculated that the highest average flux available for the entire hot zone is 370 cal/cm<sup>2</sup> sec at a normal incidence solar radiation of 1.51 Ly/min, the highest value recorded in the Boston area during the last seven years.

These measurements have shown a direct relationship between normal incidence solar radiation and the concentrated flux at the image area measured by the calorimeter. By the use of the normal incidence solar radiation value and the correlation in figure 14, any desired flux value from 35 cal/cm<sup>2</sup> sec to approximately 330 cal/cm<sup>2</sup> sec can be attained on the solar furnace. Thus the solar furnace shows excellent possibilities for use as a high intensity thermal radiation standard. With an average deviation in measured flux values of only 3.7 per cent and a maximum

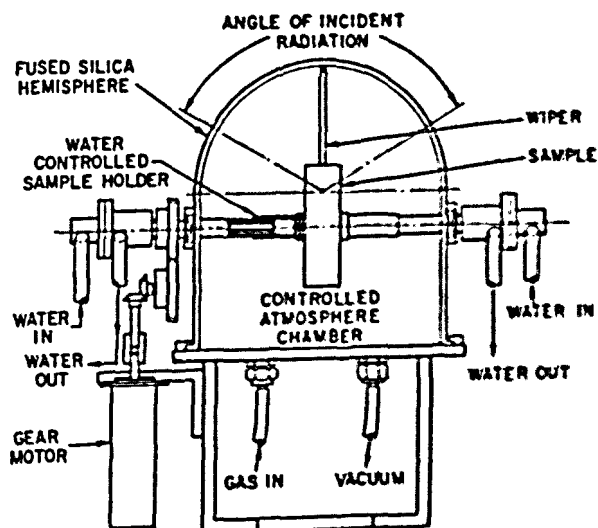


Figure 12. Watercooled, controlled atmosphere sample holder

Table 2. Flux versus screen position measured in the Avco RAD 60-inch solar furnace  
(Normalized to 1 Ly/min normal incidence solar radiation)

	Screen position				
	0.5 cm	6.5 cm	12.8 cm	18.1 cm	Full out
Flux values (cal/cm <sup>2</sup> sec) . . .	34.08	53.91	96.46	168.59	235.94
	34.16	54.44	97.27	168.92	237.23
	34.18	54.50	97.45	169.47	238.10
	34.35	55.30	97.59	169.65	239.66
	34.59	55.51	97.69	170.30	240.42
	34.62	55.63	97.78	170.46	241.28
	34.67	55.66	98.35	170.51	241.33
	35.00	55.69	98.51	171.04	241.50
	35.02	55.83	98.90	171.43	241.68
	35.05	55.94	99.06	171.43	241.99
	35.14	55.95	99.09	171.56	242.46
	35.27	56.21	99.55	171.59	242.74
	35.31	56.36	99.62	171.79	243.31
	35.48	56.44	99.99	171.98	243.42
	35.49	56.53	100.18	172.39	244.96
	35.59	56.56	100.76	173.03	245.12
	35.61	56.61	102.23	173.04	245.13
	35.69	56.84	102.27	173.24	245.60
	35.85	56.96	102.33	173.49	246.31
	35.87	57.20	103.07	173.76	246.45
	35.90	57.26	103.12	174.47	247.21
	35.93	57.34	103.15	174.61	247.46
	35.93	57.41	103.16	174.63	247.63
	35.96	59.25	103.24	174.88	247.72
	36.02	59.48	103.44	175.49	248.01
	36.07	59.90	104.07	175.70	248.16
	36.16	60.32	104.35	175.71	248.72
	36.18	60.75	105.88	177.92	249.09
	36.44	61.02		178.57	249.49
	36.48	61.72		179.21	249.74
	36.69				251.36
	36.81				251.51
	36.82				251.83
	37.07				252.42
	37.08				253.86
	37.13				
Average flux value . . . . .	35.67	57.08	100.63	172.96	245.40
Deviation from the average (%) . . .	± 4.4	± 6.8	± 4.6	± 3.1	± 3.7
Median flux value	35.85	56.55	100.09	172.71	245.60
Deviation from the median (%) . . .	± 4.2	± 6.9	± 4.8	± 3.1	± 3.7

average flux value of 330 cal/cm<sup>2</sup> sec, it is far superior to any other thermal radiation standard known to be available at present. It is also expected that with further refinement of the measuring technique the precision of the proposed standard will be improved.

### Radiometry

The calorimetric measurements yield an average value for the flux across the entire orifice. The flux however is not uniform but shows a very sharp peak at the center of the image. In order to measure the flux distribution with fine resolution, a radiometer is needed which has a small sensing area and

which can be moved across the hot zone without damage. The only fast response instrument available with the necessary characteristics for the measurement of high heat fluxes encountered in solar furnaces is the Gardon radiometer (7). It consists of a water-cooled copper-constantan thermocouple, the constantan being in the form of a thin, circular foil. The diameter of the foil defines the resolution of the instrument. As supplied by the manufacturer, the foil is coated with carbon black, deposited by burning camphor.

During his investigations, the author observed that the carbon black coating has two major deficiencies. First, its emissivity is not constant above 270°C,

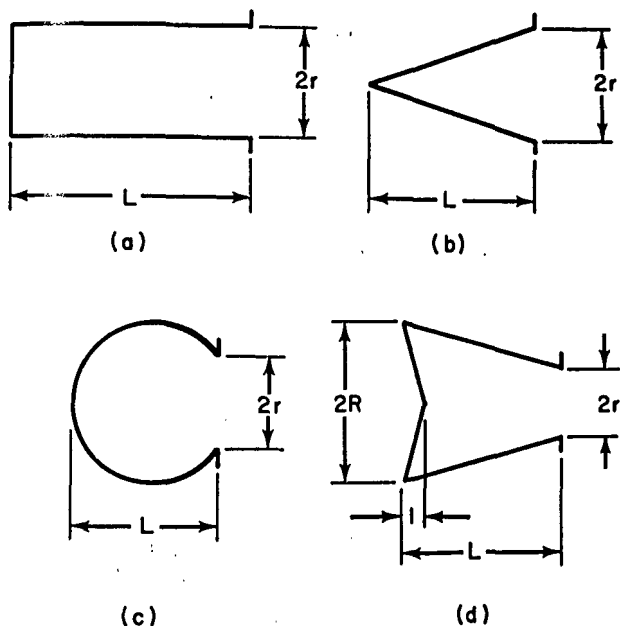


Figure 13. Artificial blackbody shapes

a temperature which the foil may reach in a solar furnace. Secondly, the carbon tends to burn off in the presence of oxygen at high heat fluxes thus changing the sensitivity of the instrument.

It is believed that a solution to this problem may be found by replacing the carbon coating with one of magnesium oxide. While the emissivity of MgO is much lower than that of carbon, the coating is very stable for all flux values under consideration, even in oxidizing atmospheres. It has been reported (8) that the reflectivity of MgO changes with time. This aging effect was attributed to the decomposition of magnesium nitride traces under the influences of u.v. radiation. It is assumed that the traces of magnesium nitride are formed when MgO is deposited by burning magnesium in air. The concentrated flux in an image furnace contains high intensity u.v. radiation. It is correct, therefore, to assume that whatever  $Mg_3N_2$  has been formed during the MgO deposition is completely decomposed shortly after the coating is first exposed to the flux in the image furnace. A similar consideration can be applied to show that the slight hygroscopic nature of MgO will not affect the reflectivity of the coating during measurements.

Another advantage of the MgO coating over the carbon coating is the fact that an old, contaminated coating can be easily removed with water and a new coating quickly applied.

A number of measurements have been performed in the solar furnace using an MgO-coated radiometer. The results indicate good stability and reproducibility even at the highest flux values at the center of the focal area, estimated at approximately  $500 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec}$ .

### The shutter

In many image furnaces the intensity of the flux impinging on a specimen is controlled by a cylinder moving along the optical axis. For certain experiments, however, an instantaneous on-off control is necessary. Venetian-blind-type shutters are now in use on some furnaces (9) which combine the effect of flux attenuation and on-off control. A disadvantage of this mechanism is that even in the fully open position it blocks somewhat the passage of radiation due to the thickness of the slats and the support members.

A fast action, on-off shutter has been designed, which does not cast any shadow on the reflector when in a retracted position. Figure 15 illustrates the mechanism of the shutter. The flux interceptor has a ribbed umbrella-like structure which is supported by a telescoping tube. In its retracted position the entire structure is behind the reflector; when not needed, it can be swung away from the observation

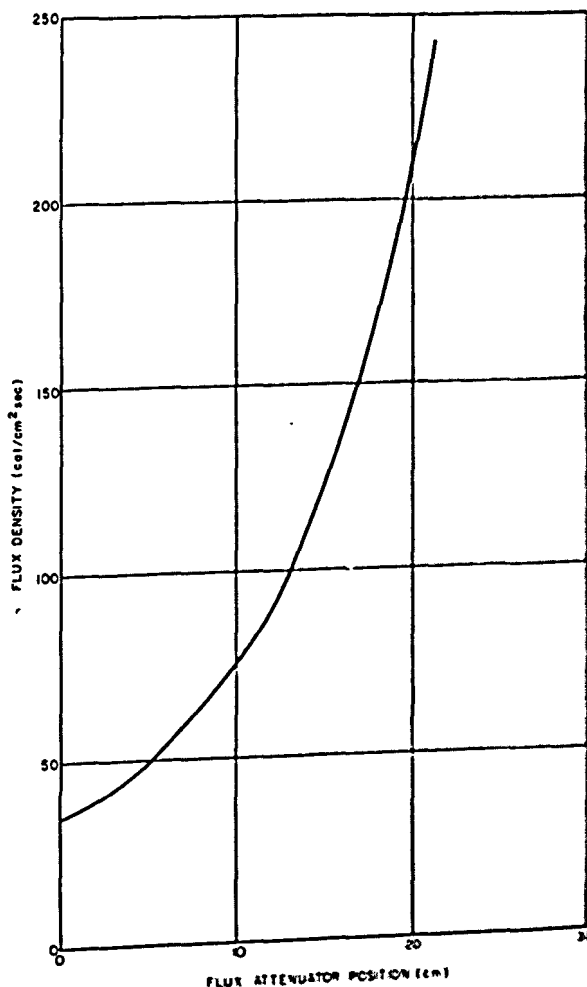


Figure 14. Flux versus attenuator position in the solar furnace

hole. It is extended by the application of compressed air and retracted by vacuum. In the center of the telescope structure, there is another telescoping tube which permits observation of the sample during the entire operation.

### A new method for the manufacture of precision reflectors

Most image furnaces presently in use are constructed with one-piece reflectors. With a few exceptions, these reflectors were built for purposes other than use in image furnaces, as the number of image furnaces is too small to justify the large investment for the manufacture of a precision reflector. As a consequence, the optical parameters of image furnaces are restricted by the sizes and properties of available reflectors.

During these investigations, the author found that two recently developed processes, when combined, can be used for the fabrication of inexpensive, precision paraboloidal reflectors with any aperture up to 60 feet. The first stage in the manufacture is the fabrication of a plastic paraboloidal dish. An epoxy resin is mixed with a catalyst and poured on to a casting table rotating at a constant angular velocity. The liquid resin surface forms a paraboloid of rotation. The focal length of the paraboloid is a function of the angular velocity, while the diameter is determined by a confining frame on the casting table. The entire system is rotated until the resin hardens, forming a

precision paraboloidal dish with a very smooth surface. The largest diameter dish fabricated according to this method up to the present time is 28 feet, but the manufacture of dishes up to 60 feet in diameter is planned.

In the second stage, a die is made by taking a casting from a wedge-shaped section of the paraboloidal dish. Aluminum sheet will be formed explosively on to this die, thus producing petals of the reflector. The petals are accurately trimmed on the explosive forming die and adhesively bonded to the plastic paraboloidal dish to form a reflector. A manufacturer in the USA is equipped to explosively form petals up to 25 feet in length. Since the center of the reflector will be cut to form an observation hole, the 25-foot-long petals are suitable to line a 55-foot-diameter dish.

Specularly finished aluminum is an excellent reflecting surface for visible and infrared radiation. When exposed to the atmosphere, however, its reflection coefficient decreases with time. Further, being rather soft, it scratches easily during handling and cleaning. A finishing process called Alzak, which protects aluminum against corrosion and abrasion, was found to be suitable to line the plastic dish. Samples of Alzak-finished aluminum sheets have been continuously exposed to the laboratory and outside atmosphere respectively for 46 days. No deterioration of the mirror finish was observed. Another Alzak-processed sample was washed with detergent and water 63 times without visible deterior-

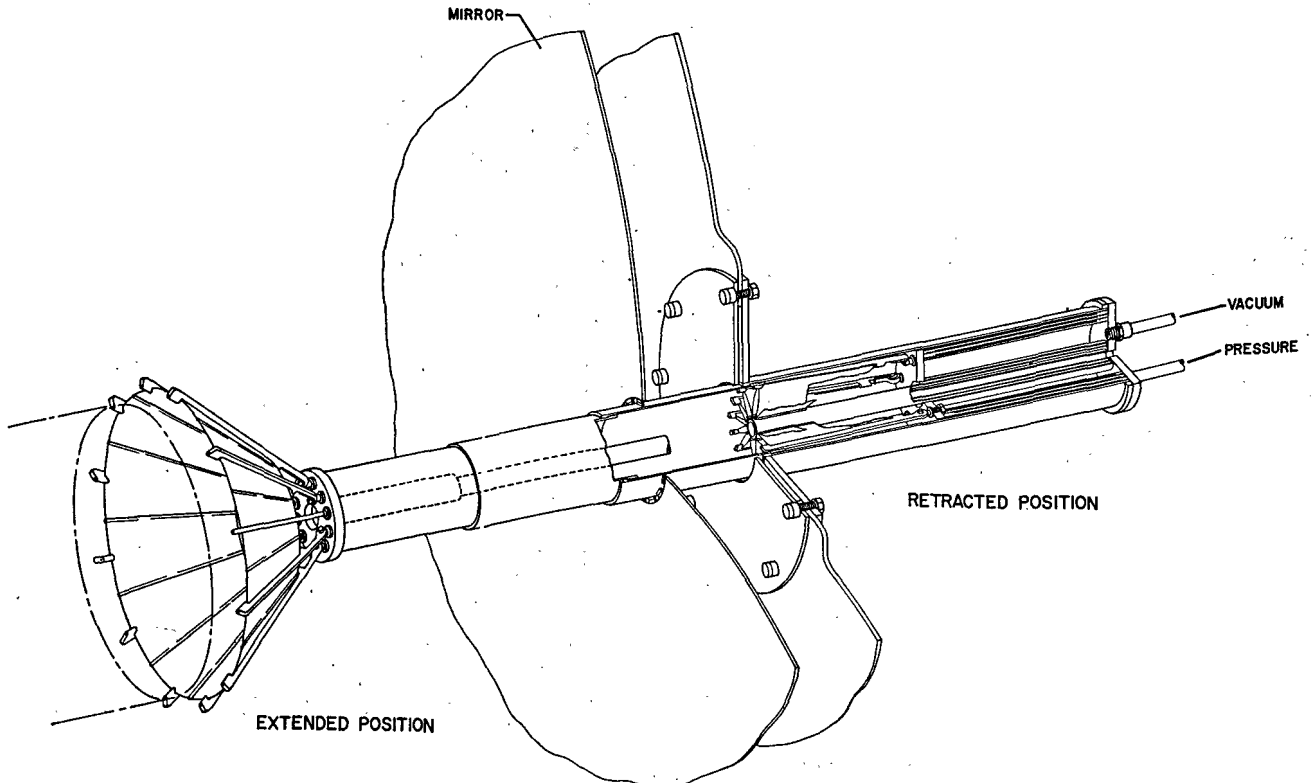


Figure 15. Solar furnace shutter

ation. The same sample, together with a commercial grade aluminum alloy and a pure aluminum sample, was placed in direct contact with crystals of corrosive sublimate ( $\text{HgCl}_2$ ). Within a few minutes, the two latter samples showed corrosion marks and after 24 hours deep corrosion pits. The Alzak-finished sample did not show any deterioration even after 24 hours of contact.

### Investigations recommended

In many cases the restrictions of the solar furnace run contrary to the fundamental concept of a planned investigation. In the following, determinations are listed for which there appears to be a reasonable probability of overcoming restrictions specific to solar furnaces. Following the suggested measurement or experimentation, accessory equipment is also listed which will have to be specially developed or modified from conventional equipment for the planned work. Each piece of equipment is listed only once although it may be required for several other recommended experiments.

#### MEASUREMENT OF PHYSICAL PROPERTIES

1. *Temperature.* Required: mechanism to position the sample in the three spatial co-ordinates, observation hole at the center of the reflector, flux control, mechanism to separate radiation emitted by and reflected from the sample, telescope for the close observation of the sample, manual or recording optical pyrometer or radiation pyrometer designed for the small sized target.
2. *Emissivity.* Required: watercooled, calibrated radiometer on a semicircular mount permitting measurement at any angle up to  $90^\circ$  off the optical axis, monochromator for spectral emission measurements.
3. *Melting point.* Required: controlled atmosphere sample holder with rotating sample mount.
4. *Thermal expansion coefficient.* Required: controlled atmosphere sample holder with mechanism to rotate the sample normal to the optical axis, reflector behind the sample, specially designed optical cathetometer.
5. *Electrical resistivity.* Required: water-cooled, rotating copper contacts with specially prepared faces, sliding contacts for connection with standard measuring instruments.
6. *Dielectric constant.* Required: resonant cavity dielectrometer modified for solar furnace space arrangement.
7. *Thermionic emission.* Required: vacuum sample holder for closely spaced systems with a special window material for gas filled systems, cooled contact to standard measuring instruments.
8. *Evaporation rate.* Required: controlled atmosphere sample holder with mechanism for removal of material, fast action shutter.

9. *Magnetic susceptibility.* Required: thermally shielded electromagnetic equipment, cooled contacts.

10. *Specific heat.* Required: copper block calorimeter fitting into sample holder with special sample-suspension and dropping mechanism.

11. *Radiation standard.* Required: water-cooled radiation calorimeter with differential thermopiles.

#### OBSERVATION AND MEASUREMENT OF CHEMICAL PROPERTIES

Required: mechanism to feed solids, liquids and gases into a controlled atmosphere reaction chamber and to remove reaction products. For gas-gas reactions, an inert refractory surface to absorb radiant energy. The design and performance of these mechanisms will vary according to the planned reaction.

#### SPECIAL OPERATIONS

1. *Growing of single crystals.* Required: powder feed and rotating crystal mount, automatic temperature control monitored by a recording optical or radiation pyrometer.

2. *Zone refining.* Required: sample rod support at both ends, mechanism to oscillate the sample across the image area with adjustable frequency and amplitude.

3. *High temperature fabrication.* Required: mounts to weld thermocouple beads in inert atmosphere above  $2000^\circ\text{C}$ , shaping of ceramics, welding ceramics to ceramics or to metals, cutting and casting refractory materials. Remote control manipulators, electronic position indicators, secondary mirrors of special design and flux redistributors may also be required.

The above list is not all inclusive; it is only illustrative for the type of work which can be successfully pursued in a solar furnace. Very little of the listed special ancillary equipment has been already developed. Accordingly, after it has been established that the planned work is suitable for solar furnace operations, the special equipment need has to be determined, and finally the equipment has to be developed together with techniques of mounting and operation. Only with this approach to experimental problems can the solar furnace become a unique and important high temperature research tool.

#### Acknowledgement

The author wishes to express his appreciation to P. Sheehan for his assistance in the experimental work and to R. Barriault for valuable suggestions in the preparation of this paper.

The work reported in this paper was sponsored by the Electronics Research Directorate of the Air Force Cambridge Research Center, Air Research and Development Command under contract AF19 (604)-7204.

## References

1. Laszlo, T. S., Solar Furnace in High-Temperature Research, *Science* 124 : 797, 1956.
2. Glaser, P. E., Engineering Research with a Solar Furnace, *J. Solar Energy* 2 : 7, 1958.
3. Laszlo, T. S. and Klamkin, M. S., Determination of the Temperature Dependence of Material Properties in Image Furnaces, *Scientific Report No. 1, RAD-TM-60-67 Solar Energy IV* : 20, 1960.
4. Farber, J., Images of Very High Temperature Sources, *Proc. of the Symposium High Temperature—A Tool for the Future, 1958*, Stanford Research Institute; Glaser, P. E., High Radiation Flux, Absolute Water-Flow Calorimeter, *Rev. Sci. Instr.* 28 : 1084, 1957.
5. Buckley, H., On the Radiation from the Inside of a Circular Cylinder, *Phil. Mag.* 4 : 753, 1927; 6 : 447, 1928; 17 : 576, 1934.
6. Gouffé, A., Corrections d'ouverture des Corps-noirs Artificiel Compte Tenu des Diffusions Multiples Internes, *Rev. D'Optique* 24, No. 1-3 : 1, 1945.
7. Laszlo, T. S., Temperature and Flux versus Geometrical Perfection, *J. Solar Energy I* : 78, 1957.
8. Middleton, W. E. and Sanders, C. L., The Absolute Spectral Diffuse Reflectance of MgO, *J. Opt. Soc.* 41, No. 6 : 419, 1951.
9. Davies, J. M. and Cotton, E. S., Design of the Quartermaster Solar Furnace, *J. Solar Energy I* : 16, 1957.

## Summary

Unusual heating conditions place limitations on experimentation in a solar furnace. It is necessary to use methods and instrumentation which take into consideration these limitations. The first limitation is the small size of the hot zone. This can be overcome only by using very large solar collectors. Not only are the technical problems involved in the construction and operation of large solar furnaces considerable, but usually the precision of the collectors decreases with increase in size and as a consequence the maximum obtainable heat flux is also lower. It is suggested that the arrangement of the experiment be changed in such a fashion that a smaller heated portion would provide the required information.

The second limitation is that heating takes place only at the front of the sample. The sample can be rotated around an axis perpendicular to the optical axis of the furnace, in order to overcome this problem.

The third restriction is the non-uniform flux across the image area. This can be corrected optically by using additional, special elements, resulting in a decrease in maximum obtainable flux. Another approach is to resort to a new experimental technique.

A sample holder (figures 1-3), has been built in which the sample can be rotated. A glass or fused silica hemisphere tops the refractory chamber. An oscillating blade wipes condensations off the inside of the hemisphere. Refractory materials have been melted in this sample holder. Figures 4-7 show a molten crater of alumina with voids formed during the cooling, crystallization process. Single crystals are visible inside the voids. The slow cooling is indicated by concentric rings, marking the step-by-step contraction of the molten crater. Figures 8-10 show a zirconia sample. The sharp definition of the hot zone is visible. During the fast cooling, a thin, quenched layer formed at the inside of the crater. Below this layer, somewhat larger single crystals formed due to the slower rate of cooling. Figure 11

shows the zone effect of the diffusion of impurities in the alumina sample.

A second sample holder permits the rotation of the sample around an axis perpendicular to the optical axis of the furnace (figure 12). One of the clamps is driven by a gear motor; the other rotates freely. Both clamps are water-cooled. This sample holder is used with the new technique which was developed to overcome the effect of uneven flux distribution in the image area. This technique requires that the desired property of a sample (e.g., electrical resistivity) be measured at different temperature levels at the center of the image while the edge of the sample is kept at a constant, low temperature. The different temperature levels can be produced by the use of a flux attenuator in the furnace, while the constant temperature at the edge can be maintained with the water-cooled clamps. The details of this method together with its mathematical apparatus are described in reference 3.

Water-cooled calorimeters are used for the measurement of high heat fluxes. The radiant energy enters a cavity through an orifice and heats up the walls. The walls are cooled by distilled water. From the temperature rise and the flow rate of the water, the heat flux is calculated. The cavity should be of such a construction that it will trap the highest possible fraction of the incident radiation, thus approximating blackbody properties. Buckley (5) found that a cylindrically shaped cavity with a length/orifice ratio of 3.8 gives radiation intensities within 1 per cent of blackbody radiation if the emissivity of the wall is 0.75. For materials of higher emissivity, the length of the cavity can be greatly reduced without reducing the orifice radius as well.

Gouffé found (6) that, above a length/orifice ratio of 2, the most favorable shape is the sphere. The results of his calculations are presented in table 1. The author devised a new shape for artificial blackbodies consisting of a truncated right cone with the smaller end as the orifice. The bottom of the cavity

is a right circular cone (figure 13 (d)). In a cavity of this shape, only a very small fraction of the total area "sees" the orifice perpendicularly; and accordingly, losses due to reradiation are low. The comparison of the efficiency of this shape with those of conventional shapes is presented in table 1. The new shape appears to trap a larger portion of the incident energy than all other shapes listed in the table up to a length/orifice diameter of 8, a much higher value than usually considered for cavities. A further evaluation of the new cavity shape is in progress, based on the consideration of multiple reflections.

A calorimeter, employing the new cavity shape, was used for flux measurements in a 60-inch solar furnace at various flux attenuator positions. The results are presented in table 2 and figure 14. The average deviation for repeated measurements at the highest flux values is approximately 3.7 per cent. The average highest flux value for the entire focal area measured to date is 321 cal/cm<sup>2</sup> sec at a normal incidence solar radiation of 1.34 Ly/min. With a normal incidence value of 1.51 Ly/min, this would correspond to 370 cal/cm<sup>2</sup> sec.

The good correlation between normal incidence solar radiation and flux at the focal area makes it possible to use the solar furnace as a radiant flux standard with much higher flux values and better reproducibility than any other standard available at present.

A Gardon radiometer (7) can be used for the measurement of high heat fluxes in the solar furnace with fast response and fine resolution. The carbon black coating of the instrument, however, does not permit reliable measurements in the highest flux ranges of the furnace. MgO coating was applied with good results in stability and reproducibility.

A fast action on-off shutter has been designed which does not cast any shadow on the reflector when in a retracted position (figure 15). The shutter

is extended by compressed air and retracted by vacuum. When not in use, it can be swung out of the way. A telescoping tube at the center permits continuous observation while the shutter is in use.

A new method for manufacturing large, precision paraboloid reflectors consists of two steps. The first is the casting of a liquid epoxy resin mixed with a catalyst on to a table rotating at a constant angular velocity. The resin sets in the shape of a rotational paraboloid. The focal length is determined by the angular velocity and the diameter by a frame on the casting table. In the second stage, a die is made from the paraboloid dish by making a wedge shaped casting. Aluminum sheet is shaped by explosive forming into the die. The aluminum wedges are adhesively bonded into the paraboloid dish, resulting in a reflective lining. It was found that Alzak-finished specular aluminum resists well atmospheric and chemical corrosion as well as mild abrasion.

In the following, determinations are listed for which there appears to be a reasonable probability of overcoming restrictions specific to the solar furnace:

(a) Measurement of physical properties: temperature, emissivity, melting point, thermal expansion coefficient, electrical resistivity, dielectric constant, thermionic emission, evaporation rate, specific heat, radiation standard;

(b) Observation and measurement of chemical properties;

(c) Special operations: growing of single crystals, zone refining, high temperature fabrication.

This list is not all inclusive. When planning an experiment, one should first establish that it is suitable for solar furnace work, then the special equipment need has to be established, and finally the equipment has to be developed together with techniques for mounting and operation.

## NOUVELLES TECHNIQUES ET PERSPECTIVES DANS LE DOMAINE DES FOURS SOLAIRES

### Résumé

Les caractéristiques peu communes du chauffage qu'il réalise imposent des limites aux expériences qui peuvent se faire avec un four solaire. Il convient d'avoir recours aux méthodes et aux instruments qui tiennent compte de ces limites. La première est l'exiguïté de la région chaude. Cette difficulté ne pourrait être résolue qu'en ayant recours à des collecteurs solaires de très grandes dimensions. Non seulement les problèmes techniques qui se présentent dans la construction et l'exploitation de grands fours solaires sont importants mais, habituellement, la précision des collecteurs diminue avec l'augmentation de leur taille, si bien que le flux de chaleur maximum qui peut être réalisé s'en trouve réduit. L'auteur

suggère que les modalités expérimentales soient modifiées de manière à permettre l'obtention des renseignements nécessaires en se servant d'une région chaude de moindres dimensions.

La seconde limite est imposée par le fait que le chauffage n'a lieu que sur l'avant de l'échantillon. Pour surmonter cet inconvénient, on peut faire tourner l'échantillon autour d'un axe perpendiculaire à l'axe optique du four.

La troisième limite réside dans le manque d'uniformité du flux dans la zone de l'image. Ceci peut se résoudre par des procédés optiques, en se servant d'éléments supplémentaires spéciaux qui provoquent,

en fin de compte, une réduction du flux maximum que l'on peut réaliser. Une autre technique consiste à modifier les modalités de l'expérience.

On a réalisé un porte-échantillon (figures 1 à 3) avec lequel on peut faire tourner cet échantillon. Un hémisphère en verre ou en silice coulée recouvre l'enceinte réfractaire. Une lame oscillante sert à essuyer la condensation sur la surface interne de cet hémisphère. On a réussi à faire fondre des matériaux réfractaires dans ce porte-échantillon. On voit aux figures 4 à 7 un cratère fondu d'alumine avec certaines lacunes apparues pendant le processus de refroidissement et de cristallisation. On aperçoit des cristaux isolés dans les lacunes. La lenteur du refroidissement est révélée par la présence d'anneaux concentriques marquant la contraction progressive du cratère en fusion. On trouve, aux figures 8 à 10, un échantillon d'oxyde de zirconium. On observe la définition bien marquée de la zone chaude. Au cours du refroidissement rapide, il s'est formé une couche mince trempée à l'intérieur du cratère. Des cristaux individuels un peu plus gros se sont formés sous cette couche, en raison du régime de refroidissement plus lent. La figure 11 révèle l'effet de zone de la diffusion des impuretés dans l'échantillon d'alumine employé.

Un second porte-échantillon permet de faire tourner cet échantillon autour d'un axe perpendiculaire à l'axe optique du four (figure 12). L'une des pinces qui le tiennent est entraînée par un moteur à engrenages, l'autre tourne folle. Elles sont refroidies par l'eau toutes les deux. Ce porte-échantillon s'utilise dans le cadre de la nouvelle technique mise au point pour surmonter la difficulté créée par les inégalités de distribution du flux dans la région de l'image. Cette technique exige que les propriétés que l'on cherche pour un échantillon (par exemple sa résistivité électrique) soient mesurées à divers niveaux de température au centre de l'image, tandis que ses bords sont tenus à une température réduite constante. On peut produire divers niveaux de température en se servant d'un atténuateur de flux dans le four, tandis que la constance de la température des bords peut être maintenue par les pinces à refroidissement par l'eau. Les détails de la méthode, avec l'appareillage mathématique qui lui correspond, sont décrits par Laszlo et Klamkin (3).

On se sert de calorimètres à refroidissement par l'eau pour mesurer les flux de chaleur élevés. L'énergie rayonnante pénètre dans une enceinte par un orifice et en chauffe les parois. Celles-ci sont refroidies par de l'eau distillée. On calcule le flux de chaleur à partir de la montée de température de l'eau et de son débit. L'enceinte doit être réalisée de telle sorte qu'elle emprisonne la plus grosse fraction possible du rayonnement incident, se rapprochant en cela du corps noir idéal. Buckley (5) a découvert qu'une enceinte cylindrique ayant un rapport longueur/diamètre de l'orifice égal à 3,8 donne des intensités de rayonnement qui diffèrent de moins de 1 p. 100 du rayonnement du corps noir si l'émissivité de la paroi est de 0,75. Pour les matériaux dont l'émissivité

est plus forte, on peut réduire sensiblement la longueur de l'enceinte sans, pour autant, diminuer le diamètre de l'orifice.

Gouffé a déterminé (6) que, pour les rapports longueur/orifice dépassant 2, la forme optima est une sphère. On trouvera les résultats de ses calculs au tableau 1. L'auteur a conçu une nouvelle forme pour les corps noirs artificiels, constituée par un tronç de cône droit dont l'orifice se trouve dans la petite base. Le fond de la cavité ou de l'enceinte épouse la forme d'un cône circulaire droit (figure 13 d). Dans une cavité de cette forme, ce n'est qu'une très petite fraction de l'aire totale qui « voit » l'orifice perpendiculairement, si bien que les pertes dues au rayonnement secondaire sont faibles. Le tableau 1 donne une comparaison du rendement de cette forme avec celui des profils classiques. La nouvelle forme semble capter une plus forte proportion de l'énergie incidente que toutes les autres qu'indique le tableau, jusqu'à un rapport longueur/diamètre de l'orifice de 8, valeur beaucoup plus forte que celles que l'on envisage habituellement pour les cavités. On procède actuellement à une évaluation plus poussée de cette nouvelle forme de cavité, d'après des considérations ayant trait aux réflexions multiples.

Un calorimètre qui fait usage de la nouvelle forme d'enceinte a été utilisé pour mesurer le flux dans un four solaire de 60 pouces (1,52 m) pour diverses positions de l'atténuateur de flux. L'écart moyen observé avec des mesures répétées, pour les plus grosses valeurs du flux, est de l'ordre de 3,7 p. 100. La valeur maxima moyenne du flux mesurée jusqu'à présent pour la totalité de l'aire du foyer est de 321 calories par centimètre carré par seconde sous un rayonnement solaire à incidence normale de 1,34 Ly/min. Avec une valeur de l'incidence normale de 1,51 Ly/min, on obtiendrait 370 calories/cm<sup>2</sup>/sec.

La bonne corrélation obtenue entre le rayonnement solaire à incidence normale et le flux dans la région du foyer permet l'emploi du four solaire comme étalon de flux rayonnant pour des valeurs beaucoup plus élevées de celui-ci et une meilleure reproductivité qu'avec toute autre norme dont on dispose actuellement.

On peut se servir d'un radiomètre de Gardon (7) pour mesurer les flux les plus intenses dans le four, dans des conditions qui se caractérisent par la vitesse de réaction et la finesse de la résolution. La couche de noir de fumée qui recouvre l'instrument ne se prête cependant pas à des mesures dignes de foi dans la gamme des flux maxima du four. On a fait des applications de MgO avec de bons résultats quant aux critères de stabilité et de reproductivité.

On a mis au point un obturateur à fonctionnement rapide du type « marche-arrêt » qui ne projette aucune ombre sur le réflecteur en position de retrait (figure 15). Cet obturateur s'avance sous l'action de l'air comprimé et s'efface sous celle du vide. On peut le faire pivoter de manière à le mettre complètement à l'écart quand il n'est pas en service. Un tube télescopique prévu dans la partie centrale permet de



procéder à des observations continues pendant le fonctionnement du volet d'obturation.

L'auteur décrit une nouvelle méthode de fabrication de réflecteurs de grandes dimensions et ayant exactement la forme d'un paraboloïde, qui comporte deux stades. Le premier est constitué par la coulée d'une résine liquide de la série époxy mélangée avec un catalyseur, sur une table qui tourne à une vitesse angulaire constante. La résine se durcit, tout en épousant la forme d'un paraboloïde de révolution. La distance focale est définie par la vitesse angulaire du système et le diamètre par un cadre installé sur la table de coulée. Au second stade, on établit un moule à partir du paraboloïde en coulant une pièce en forme de coin. On adapte de la tôle mince d'aluminium au profil voulu par déformation explosive dans le moule. Les coins en aluminium sont fixés au paraboloïde par un adhésif approprié, ce qui donne un revêtement réfléchissant. On a découvert que l'aluminium spéculaire traité à l'Alzak résiste fort bien à la corrosion atmosphérique et chimique, ainsi qu'à l'usure par de légers frottements.

On donne ci-dessous une liste des déterminations pour lesquelles on peut espérer surmonter les difficultés propres à l'emploi du four solaire :

a) Mesure des propriétés physiques : température, émissivité, point de fusion, coefficient thermique de dilatation, résistivité électrique, constante diélectrique, émission thermoionique, régime d'évaporation, chaleur spécifique, normes de rayonnement ;

b) Observation et mesure des propriétés chimiques ;

c) Opérations spéciales : réalisation de cristaux uniques ou isolés, raffinage par zones, transformations industrielles des matériaux à haute température.

Cette liste ne s'étend pas à toutes les situations possibles. Quand on prépare une expérience, on doit tout d'abord établir qu'elle se prête au travail avec le four solaire, après quoi on définit les besoins de matériel spécial et, finalement, on met ce matériel au point, ainsi que les techniques de mise en place et d'utilisation qui lui conviennent.

## ÉTUDE SUR LES CONCENTRATIONS ÉNERGÉTIQUES DONNÉES PAR LES MIROIRS PARABOLIQUES DE TRÈS GRANDE SURFACE

A. Le-Phat-Vinh \*

La construction de miroirs paraboliques de très grande surface nécessite la recherche de solutions approchées permettant d'obtenir une surface réfléchissante aussi voisine que possible du paraboloïde théorique; le miroir sera constitué par des facettes élémentaires, à la réalisation desquelles le procédé de courbure par contrainte mécanique apporte une solution simple et très économique.

Ce procédé, imaginé et décrit précédemment par Félix Trombe, permet d'obtenir des facettes courbées grâce à l'élasticité du verre, en exerçant au moyen de vis de réglage une poussée sur la périphérie d'un miroir en même temps qu'une traction sur la partie centrale (figure 1). On arrive ainsi à rabattre les bords du miroir, initialement plan et tangent au paraboloïde géométrique, et à se rapprocher suffisamment de la surface de ce paraboloïde pour obtenir une réduction notable de la surface de la tache de lumière sur le plan focal, par rapport à celle donnée par le même miroir, avant réglage de la courbure.

La première réalisation semi-industrielle réalisée à Mont-Louis suivant ce principe est une installation de 75 kW, constituée par un miroir parabolique de 6 mètres de distance focale et de 11 mètres de diamètre environ, composé de 3 500 facettes courbées par déformation élastique.

Pour cette distance focale de 6 mètres, les courbures nécessaires ont conduit à employer des facettes relativement petites, 15 × 15 cm environ, en verre de 1,8 mm d'épaisseur. La surface des verres de cette épaisseur présente toujours de grandes irrégularités que le réglage de courbure ne permet pas toujours de compenser; cette installation, qui permet actuellement le traitement de quantités assez importantes de matériaux réfractaires, n'est cependant qu'un prototype imparfait.

Nous allons voir que les conditions de réalisation des facettes courbées sont différentes et plus favorables pour des miroirs paraboliques de grandes distances focales.

Le projet examiné ici, qui est d'ailleurs en cours de réalisation, concerne un miroir parabolique de 18 mètres de distance focale, qui permettra d'utiliser dans son volume focal une puissance de 1 000 kW, compte tenu des diverses causes de pertes d'énergie.

Les facettes élémentaires seront des miroirs rectangulaires de 40 à 50 cm de côté, en verre trempé

de 4,5 mm d'épaisseur. Ces miroirs, de fabrication industrielle courante, ne présentent pas les irrégularités de surface du verre mince, mais seulement une légère courbure régulière, qui ne gêne pas les réglages ultérieurs; ils sont percés, dans leur partie centrale, de quatre trous à travers lesquels passent librement quatre vis qui viennent se visser dans une plaque métallique rigide, derrière le miroir; une traction exercée sur cette plaque (figure 1) est transmise au miroir par les têtes de vis, tandis que des poussées agissant en sens inverse sur la périphérie du miroir permettent d'obtenir la courbure recherchée.

### Concentrations énergétiques

Des mesures ont été faites au laboratoire de Mont-Louis afin de déterminer les concentrations énergétiques que l'on peut obtenir par ce procédé.

Ces mesures, décrites en détail dans une précédente étude (32), ont été effectuées avec un miroir de 1 367 cm<sup>2</sup> et de 6 mm d'épaisseur, donc plus petit et plus épais que ceux qui seront adoptés pour l'installation de 1 000 kW dont il est question plus haut; le miroir est placé en un point d'une parabole de 18 mètres de distance focale et reçoit le rayonnement solaire réfléchi par un héliostat (figure 2) parallèlement à la direction de l'axe de la parabole. Le plan focal est matérialisé par un écran sur lequel on forme l'image du soleil en agissant sur les vis de poussée de manière que la tache de lumière, centrée sur le foyer géométrique, soit aussi réduite que possible. L'écran de réglage comporte une ouverture derrière laquelle est placée une thermopile, et l'ensemble peut être déplacé suivant deux directions rectangulaires afin d'explorer toute la tache focale avec la thermopile. D'autre part, l'intensité du rayonnement incident, reçu sur le miroir courbé en provenance de l'héliostat, est mesurée par la thermopile d'un pyréliomètre placé près du miroir courbé. Notons qu'il a été nécessaire de réduire l'intensité du rayonnement reçu sur la thermopile explorant le plan focal en interposant un disque tournant muni d'échancrures telles que la thermopile ne reçoive que  $\frac{1}{3}$  de l'énergie lumineuse concentrée. La concentration donnée aux différents points du plan focal est le rapport  $\frac{e}{e_0} \times 3$  des tensions fournies par les deux

\* Laboratoire de l'énergie solaire du Centre national de la recherche scientifique, Mont-Louis, Pyrénées-Orientales, France.

## Facteurs de réflexion

D'autres essais nous ont montré que l'on pourra adopter, pour la réalisation des facettes courbées, des glaces moins épaisses que celle qui a servi à ces mesures; on prendra des facettes de 4,5 mm d'épaisseur. Ces miroirs ont un coefficient de réflexion de 81 p. 100 environ, lorsqu'ils sont éclairés en rayonnement solaire direct.

D'autre part les miroirs d'héliostats doivent avoir, pour être suffisamment plans, une épaisseur plus grande; des miroirs de 7,5 mm d'épaisseur ont un coefficient de réflexion de 71 p. 100. Les deux réflexions successives, sur l'héliostat et sur le miroir courbé, donnent un coefficient résultant égal à 61 p. 100, donc légèrement supérieur au produit  $0,71 \times 0,81 = 57,5$  p. 100. Le coefficient de réflexion du miroir courbé est donc en réalité, pour le rayonnement reçu de l'héliostat, d'environ 86 p. 100.

Nous adopterons le coefficient résultant 61 p. 100 pour établir, à la fin de cette étude, le bilan énergétique de l'installation solaire de 1 000 kW.

## Étude géométrique

Il est intéressant de compléter les mesures de répartition énergétique par un contrôle géométrique de la surface du miroir courbé. Des essais dans ce sens ont été entrepris sur un miroir de  $45 \times 50$  cm, soit  $2\,250$  cm<sup>2</sup>, et de 4,5 mm d'épaisseur.

Le miroir est d'abord placé en un point de la parabole  $f = 18$  mètres et on règle sa courbure, comme

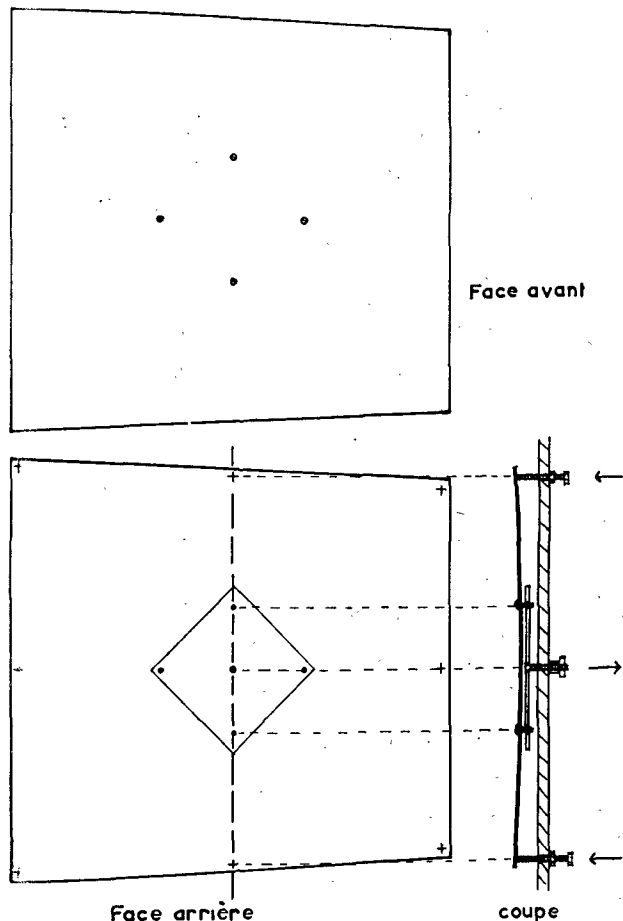


Figure 1. Miroir courbé. Schéma du dispositif de courbure

directement comparables (le facteur 3 est le facteur de réduction du disque tournant).

Afin de comparer les concentrations obtenues avec celles que donnerait une facette parfaitement parabolique, on doit tenir compte du facteur de réflexion du miroir courbé étudié. Dans le cas considéré, ce facteur était égal à 0,78. Soit  $C$  la concentration théorique calculée pour un élément parabolique, l'efficacité du miroir courbé est donc le rapport  $\frac{e}{e_0} \times 3 \cdot C \times 0,78$ .

Remarquons que le facteur de réflexion dont il est question ici est le facteur de réflexion apparent, qui fait intervenir également l'absorption d'énergie dans l'épaisseur du miroir (argenté sur la face arrière) qui est traversée deux fois par le rayonnement. Ce facteur a été mesuré pour le rayonnement ayant déjà subi une première réflexion sur l'héliostat; il est plus élevé qu'avec le rayonnement solaire direct. Cette question sera reprise plus loin.

Le tableau donné en annexe résume les principaux résultats de ces mesures énergétiques. Il résulte de ces mesures que l'efficacité du procédé de courbure par déformation élastique est, pour le miroir qui a été étudié, d'environ 65 p. 100 en ce qui concerne la concentration maximum obtenue.

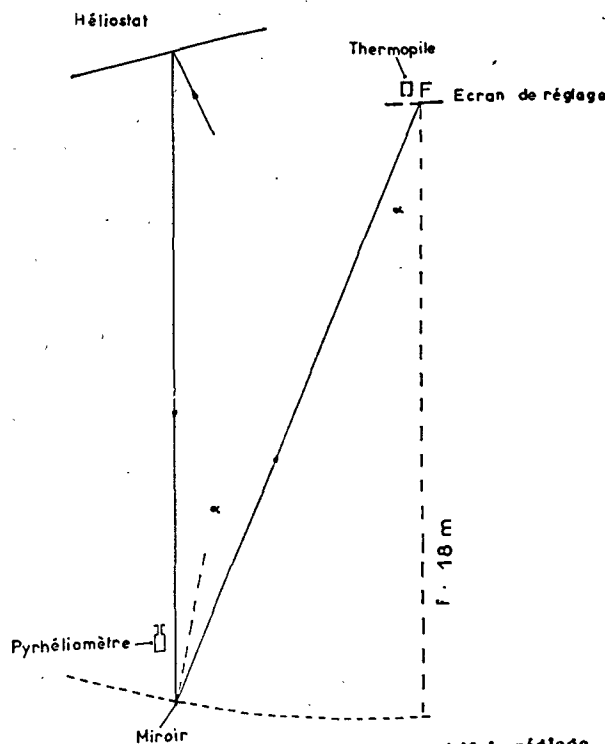


Figure 2. Schéma d'ensemble du dispositif de réglage et d'exploration de la tache focale

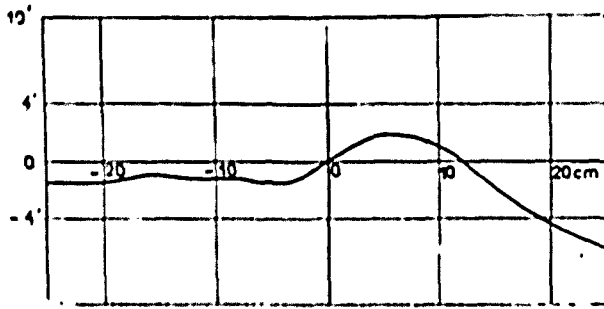


Figure 3. Courbe des écarts angulaires entre une ligne méridienne d'un miroir courbé et l'arc de parabole théorique, en fonction de l'abscisse du point considéré sur la méridienne

il a été dit précédemment, en observant la tache de lumière obtenue sur le plan focal. Le miroir est ensuite placé en respectant le réglage de sa courbure, sur un support permettant sa translation dans deux directions rectangulaires. Un théodolite dont la lunette de visée est horizontale permet de viser dans le miroir l'image d'un point de repère très éloigné; ce point, pratiquement à l'infini, est choisi dans le même plan horizontal que l'axe optique de la lunette. On a repéré, sur le miroir, les lignes méridiennes, sections de la surface du miroir par des plans passant par l'axe de la parabole de réglage. Le support est placé de manière que, au cours de la translation du miroir, une méridienne reste dans le plan de visée horizontal du théodolite. On doit alors vérifier que l'image du point de repère reste également dans ce plan.

Cette mise en station étant faite, on déplace le miroir devant le théodolite en notant, à chaque position, l'azimut de l'image du point de repère; pour deux positions voisines, l'axe optique de la lunette rencontre le miroir en deux points distants

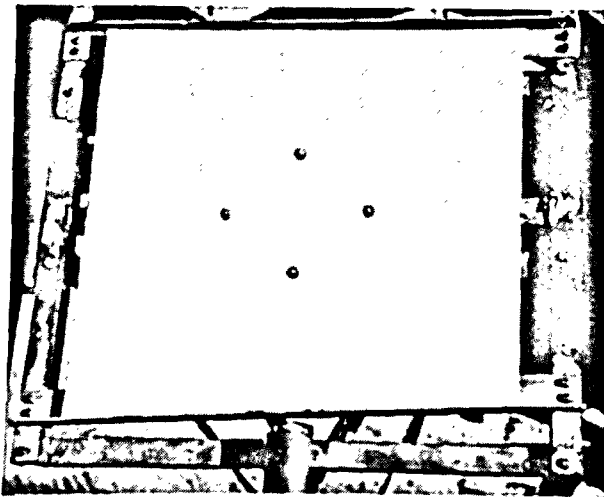


Figure 4. Miroir courbé, montage d'essai montrant la disposition des vis de réglage, face avant

de  $\Delta x$  et, par suite de la courbure, l'azimut de l'image repère varie de  $2\Delta i$ . Le rapport  $\frac{\Delta x}{\Delta i}$  donne une

valeur approchée du rayon de courbure moyen entre deux points de la méridienne considérée sur le miroir. A condition de choisir un point de repère voisin de la direction moyenne perpendiculaire au miroir courbé, on pourra négliger l'effet de la réfraction dans l'épaisseur du verre (l'argenteure étant sur la face arrière du miroir).

Pour de petits angles d'incidence, tout se passe, par suite de la réfraction, comme si le réflecteur était un miroir argenté *face avant*, mais à la distance  $e \frac{n-1}{n}$  en avant de la face argentée du miroir réel ( $e$  = épaisseur du verre,  $n$  = indice de réfraction); d'autre part, avec les faibles courbures utilisées, on négligera l'erreur due au fait que la distance  $\Delta x$  est mesurée sur la face avant du miroir.

Les mesures géométriques dont le principe vient d'être décrit seront poursuivies ultérieurement de façon plus complète. Elles ont été effectuées actuellement pour un miroir de 2 250 cm<sup>2</sup>, dont le centre était, pour le réglage de courbure, au point  $\alpha = 42^\circ$  de la parabole de 18 m de distance focale (figure 2).

Les résultats de ces mesures permettent de tracer la courbe des valeurs de l'écart angulaire entre la direction de la tangente à la méridienne considérée sur le miroir et la tangente à l'arc de parabole théorique; la courbe donnée en exemple (figure 3) est tracée en fonction de l'abscisse curviligne du point visé sur la méridienne, de part et d'autre du centre.

La poursuite de cette étude nous permettra de rechercher la position optimum à donner aux points de traction centraux, en fonction des autres paramètres géométriques, afin d'obtenir une courbure régulière.

On peut établir une comparaison entre l'efficacité des facettes courbées et celle qu'auraient des facettes planes plus petites. Supposons que l'on ait une facette plane tangente au paraboloïde théorique et telle que

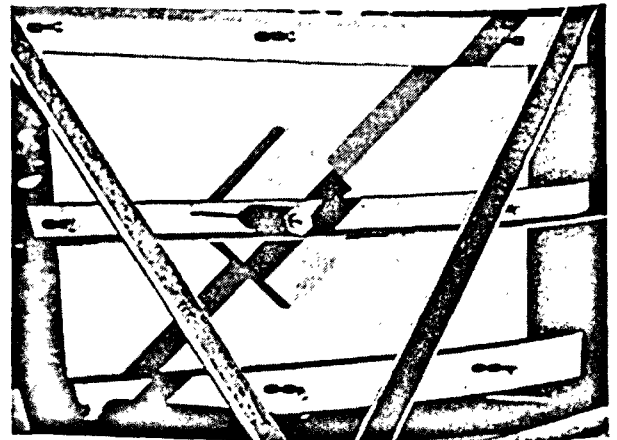


Figure 5. Face arrière

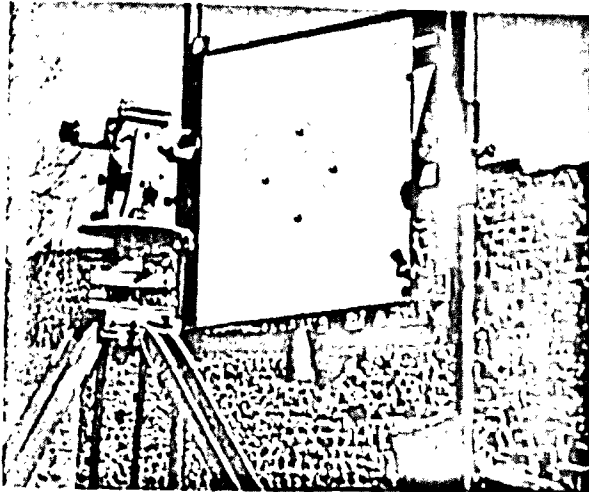


Figure 6. Contrôle géométrique au théodolite de la courbure d'un miroir

Le disque solaire vu du foyer par réflexion dans une facette soit tangent aux bords de celle-ci. Le calcul montre qu'une telle facette, placée au point  $\alpha = 30^\circ$  de la parabole de 18 mètres de distance focale aura une surface réelle d'environ  $340 \text{ cm}^2$  (étant nécessairement rectangulaire, ou trapézoïdale, pour permettre la juxtaposition). L'éclairement produit, sur le plan focal, au foyer géométrique, en admettant un coefficient de réflexion de 0,78, sera égal à  $0,78 \times \cos^2 30^\circ = 0,67$  fois l'intensité solaire. Quatre facettes, soit une surface totale de  $1360 \text{ cm}^2$ , donneront une concentration de 2,7. Les mesures montrent que le miroir courbé de  $1365 \text{ cm}^2$  donne, dans les mêmes conditions, une concentration égale à 2,9 fois l'in-

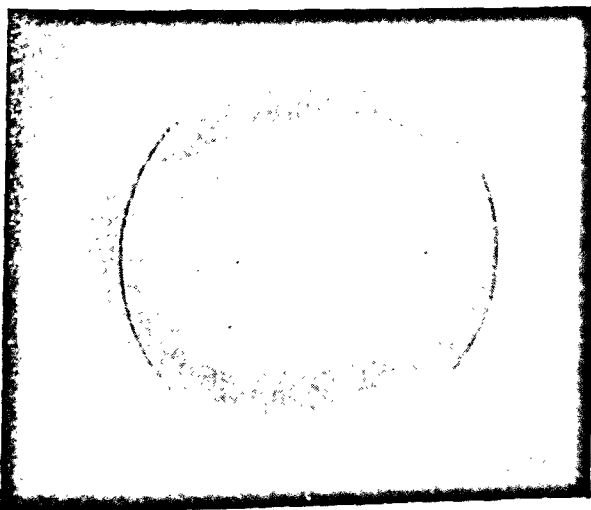


Figure 7a. Tache focale obtenue avec un miroir de  $2250 \text{ cm}^2$  placé au point  $\alpha = 42^\circ$  de la parabole,  $f = 18$  mètres. L'image est presque entièrement contenue dans un cercle de 30 cm de diamètre. L'image théorique pour un élément parabolique parfait serait une ellipse de grand axe égal à 25 cm.

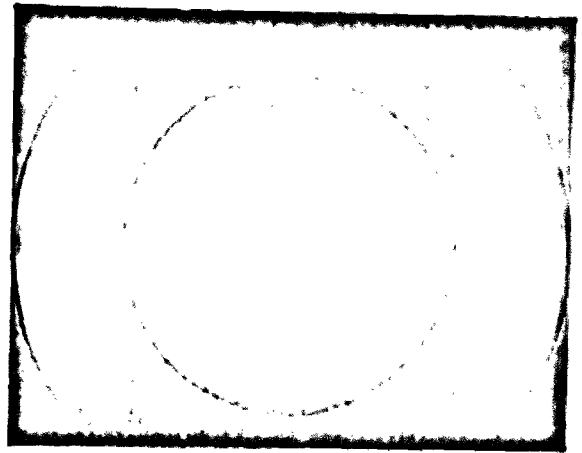


Figure 7b. Tache focale donnée, avant le réglage de la courbure par un miroir de  $2250 \text{ cm}^2$ . Le diamètre du cercle extérieur est de 30 cm et celui du cercle intérieur de 30 cm.

tensité solaire; si on tient compte des vides qui existeraient nécessairement entre les facettes planes, on voit que pour obtenir la même densité énergétique au foyer, il faudrait environ cinq fois plus de facettes planes que de miroirs courbés.

De plus, nous avons vu que l'on pourra employer des miroirs courbés de  $2250 \text{ cm}^2$  et, probablement, jusqu'à  $2500 \text{ cm}^2$ , ce qui améliore encore la concentration.

### Températures réalisables

Les calculs concernant les concentrations énergétiques que donneraient des réflecteurs paraboliques supposés géométriquement parfaits (21, 22) ont été effectués dans différents cas. On peut en déduire, connaissant l'efficacité des miroirs courbés, les tem-

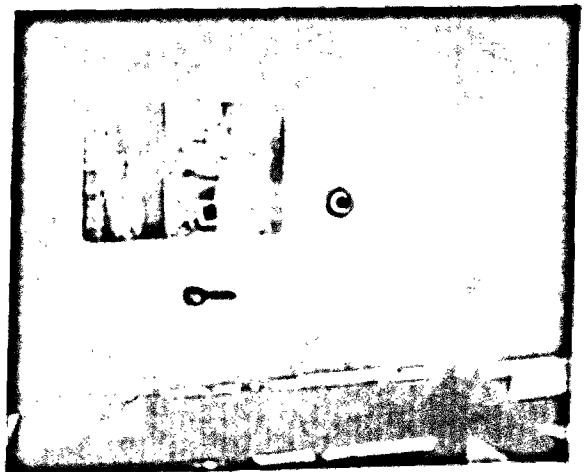


Figure 8. Exploitation de la tache focale pour une thermopile

Tableau 1

Position sur la parabole $\alpha =$	Concentration calculée	Concentration calculée avec facteur de réflexion de 0,78	Concentration mesurée avec le miroir courbé (facteur de réflexion 0,78)	Concentration mesurée: concentration calculée $\times$ 0,78
14°	7,28	$7,28 \times 0,78 = 5,68$	3,6	63 %
21°	6,68	$6,68 \times 0,78 = 5,2$	3,4	65 %
25°	6,26	$6,26 \times 0,78 = 4,88$	3,1	63,5 %
30°	5,66	$5,66 \times 0,78 = 4,4$	2,9	66 %
42°	4,09	$4,09 \times 0,78 = 3,2$	2,1	66 %

températures qui pourront être obtenues avec l'installation en cours de réalisation. Cette installation sera un miroir parabolique de rayon angulaire maximum égal à 72°, soit un rapport d'ouverture  $\frac{\text{diamètre}}{\text{distance focale}}$  égal à 3. Mais ce miroir sera tronqué, la partie inférieure du paraboloïde étant coupée au niveau du sol, à une distance de l'axe de révolution égale à environ  $0,7 \times$  distance focale.

Les calculs cités montrent qu'un tel miroir, s'il était parfaitement parabolique, donnerait à son foyer une densité énergétique égale à  $2,4 \times B_0$ , où  $B_0$  désigne la valeur de la brillance apparente (vue du sol, à travers l'atmosphère) au centre du disque solaire; avec une intensité solaire au sol de  $0,1 \text{ watt/cm}^2$ , valeur moyenne normale à Mont-Louis, on établit, en tenant compte de la loi d'assombrissement du disque solaire vers les bords, la relation  $B_0 = 1\,844,5 \text{ watts/cm}^2/\text{stéradian}$ . Si la surface du miroir considéré était parfaite, on aurait donc au

foyer une densité énergétique  $D = 2,4 \cdot B_0 \approx 4\,400 \text{ watts/cm}^2$ .

En réalité, nous avons vu que les miroirs courbés ne procurent, dans l'état actuel de leur réalisation, que 65 p. 100 de la concentration théorique; d'autre part, les deux réflexions successives donnent un coefficient de réflexion résultant égal à 0,61. On peut donc compter finalement sur une densité énergétique au foyer de  $4\,400 \times 0,65 \times 0,61$ , soit plus de  $1\,700 \text{ watts/cm}^2$ . La température du corps noir de même radiance totale, donnée par la loi de Stefan, est de  $3\,900 \text{ }^\circ\text{C}$ . Cette température ne pourrait être atteinte que par un récepteur dont la surface recevant le rayonnement serait parfaitement noire et dont le reste de la surface serait au contraire parfaitement poli.

Dans le cas d'un disque récepteur rayonnant également par la face avant et la face arrière, la température d'équilibre correspondant à une radiance totale de  $850 \text{ watts/cm}^2$  est encore de  $3\,200 \text{ }^\circ\text{C}$  environ.

### Références et bibliographie

1. Trombe, F., Foëx, M. et Henry La Blanchetais, Ch., Four solaire pour la réalisation de très hautes températures, *C.R. Acad. Sci.*, 223, 317, 1956.
2. Trombe, F., Foëx, M. et Henry La Blanchetais, Ch., Concentration d'énergie solaire pour la réalisation de très hautes températures, *Annales de Chimie*, 12<sup>e</sup> série, 385, 1947.
3. Trombe, F., Foëx, M. et Henry La Blanchetais, Ch., Utilisation de l'énergie solaire, *Journal de Recherches du CNRS*, n° 4-5, 1, 1948.
4. Davies, G.E., A method of measuring light intensities at the focus of a parabolic reflector with large relative aperture, *J. Opt. Soc. Am.*, 39, 541, 1959.
5. Trombe, F., Les Fours solaires, extrait de *Les Hautes Températures et leur utilisation en chimie*, Masson, Edit., Paris, 1950.
6. Trombe, F. et Foëx, M., Fours centrifuges à accumulation d'énergie solaire, *C.R. Acad. Sci.*, 235, 571, 1952.
7. Trombe, F., Sur la réalisation d'un four solaire semi-industriel au laboratoire de Mont-Louis (Pyrénées-Orientales), *C.R. Acad. Sci.*, 235, 704, 1952.
8. Trombe, F., Sur quelques détails de montage du four solaire semi-industriel de Mont-Louis, *C.R. Acad. Sci.*, 235, 1211, 1952.
9. Trombe, F., Le Laboratoire de l'énergie solaire de Mont-Louis, *Bull. Soc. Chim. Fr.*, 5<sup>e</sup> série, T. 20, 353, 1953.
10. Trombe, F., L'Utilisation de l'énergie solaire, état actuel et perspectives d'avenir, *Journal de Recherches du CNRS*, n° 25, 1, 1953.
11. Trombe, F. et Foëx, M., Utilisation de fours centrifuges pour le traitement par l'énergie solaire des substances à haute température, *Bull. Soc. Chim. Fr.*, 1315, 1954.
12. Trombe, F., *Machines solaires*, Congrès international sur l'énergie solaire, New Delhi, 1954.
13. Cabannes, F. et Le-Phat-Vinh, Calcul de la répartition de l'énergie solaire réfléchi par un miroir parabolique, *Journal de physique*, tome 15, 817, 1954.
14. Trombe, F., *Les Fours solaires*, Congrès de Phoenix (Arizona), 2 novembre 1955.
15. Farber, J., *Irradiance measurements in focal planes of solar furnaces*, Conférence sur l'énergie solaire de Tucson (Arizona), octobre 1955.

16. Trombe, F., *Considérations générales sur l'énergie solaire, son captage, son utilisation*, cours-conférence prononcé au Centre de perfectionnement technique, n° 3570, 2 février 1956.
  17. Boëx, M., *Les fours solaires*, cours-conférence prononcé au Centre de perfectionnement technique, Paris, 15 mars 1956.
  18. Bliss, R., Notes on performances, design of parabolic solar furnaces, *Journal of Solar Energy, Science and Engineering*, vol. I, n° 1, 23, 1957.
  19. Baum, V.A., Aparasi, R.R. et Garf, B.A., High-power solar installations, *Journal of Solar Energy, Science and Engineering*, vol. I, n° 2, 1957.
  20. Barber, J., Farber, D. et Bueton, I., Analysis of large-aperture parabolic mirrors for solar furnaces, *J. Opt. Soc. Am.*, 47 (3), 216, 1957.
  21. Hiester, N.K., Tietz, T.E., et Loh, E., Theoretical considerations on performance characteristics of solar furnaces; *Jet Propulsion*, 507, 546, 1957.
  22. Jose, P., The flux through the focal spot of a solar furnace, *Journal of Solar Energy, Science and Engineering*, vol. I, n° 4, 1957.
  23. Loh, E., Hiester, N.K. et Tietz, T.E., Heat flux measurement at the sun-image of the California Institute of Technology lens-type solar furnace, *Solar Energy, Science and Engineering*, vol. I, n° 4, 23, 1957.
  24. Nevins, R.E. et McNall, P.E., High-flux low-temperature solar collector, *Heat pip air Command*, 29 (11) 171, 1957.
  25. Simon, A.W., Calculations of the concentration of energy at points outside the focal spot of a parabolic condenser, *Journal of Solar Energy, Science and Engineering*, vol. II, n° 2, 22, 1958.
  26. Simon, A.W., Calculations of the solar radiation through the focal spot of a parabolic mirror, *Journal of Solar Energy, Science and Engineering*, vol. II, n° 2, 25, 1958.
  27. Simon, A.W., The loss of energy by absorption and reflection in the heliostat and parabolic condenser of a solar furnace, *Journal of Solar Energy, Science and Engineering*, vol. II, n° 2, 30, 1958.
- Communications présentées au Colloque international du CNRS sur les applications thermiques de l'énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie, tenu à Mont-Louis en juin 1958 :
28. Trombe, F., *Les Installations de Mont-Louis et le four solaire de 1 000 kW d'Odeillo-Font-Romeu*.
  29. Maréchal, A. et Slansky, F., *Recherche d'une forme de miroir donnant la concentration optimum du rayonnement solaire*.
  30. Le-Phat-Vinh, A., *Contribution à l'étude de la répartition de l'énergie au foyer d'un miroir parabolique*.
  31. Le-Phat-Vinh, A., *Étude expérimentale de la concentration du rayonnement solaire par des miroirs courbés sous contrainte mécanique*.
  32. Le-Phat-Vinh, A., *Répartition de l'énergie solaire au foyer d'un miroir parabolique : calcul et étude expérimentale*. Thèse de doctorat d'université, Faculté des sciences de Toulouse, 23 avril 1960.
- Brevets concernant la concentration de l'énergie solaire, déposés à la date du 31 décembre 1958 :
33. Trombe, F., Cas V, *Dispositif permettant la concentration d'énergie solaire à l'aide de surfaces réfléchissantes déformées mécaniquement*. Brevet France déposé le 11 avril 1951 au nom du CNRS, délivré sous le n° 1 035 832.
  34. Trombe, F., Cas Va, *Dispositif permettant la concentration d'énergie solaire à l'aide de surfaces réfléchissantes déformées mécaniquement*. Première addition au brevet France, n° 1035, déposé le 22 juillet 1955, sous le numéro. P.V. 55 746.

### Résumé

La réalisation de réflecteurs paraboliques de très grande surface nécessite la recherche de techniques simples et économiques; le miroir parabolique sera composé d'un grand nombre de facettes élémentaires. La présente étude concerne un procédé de réalisation de facettes courbées. Ce procédé utilise l'élasticité du verre.

Le cas étudié en particulier est celui de miroirs en verre trempé, argentés sur la face arrière, d'une surface de 2 000 à 2 500 cm<sup>2</sup>, et destinés à constituer les facettes élémentaires d'un réflecteur parabolique de 18 mètres de distance focale; la surface totale de cette installation solaire, actuellement en cours de réalisation, permettra de disposer, dans le volume focal, d'une puissance thermique de 1 000 kilowatts. Ce chiffre est prévu en tenant compte des diverses causes de pertes d'énergie, et pour une intensité du rayonnement solaire incident de 0,1 watt/cm<sup>2</sup>, valeur normale à Mont-Louis.

La courbure du miroir élémentaire est obtenue par déformation élastique, sous contrainte mécanique. Des vis de réglage, au nombre de huit, exercent une poussée à la périphérie et sur la face arrière du miroir, en même temps qu'une traction est appliquée en quatre points centraux.

Des essais ont été effectués afin de préciser l'efficacité des facettes courbées par cette méthode; le miroir étudié est placé en un point de la parabole de 18 mètres de distance focale et reçoit, parallèlement à l'axe de la parabole, le rayonnement réfléchi par un héliostat. La courbure est réglée par contrôle visuel de la forme et des dimensions de la tache de lumière obtenue sur le plan focal. Deux thermopiles permettent de mesurer simultanément l'intensité du rayonnement reçu par le miroir courbé et celle reçue en divers points du plan focal.

Ces essais ont été faits en plaçant le miroir élémentaire en divers points de la parabole.

Les densités énergétiques obtenues sont égales à 65 p. 100 de celles que donneraient des facettes de même surface et rigoureusement paraboliques; avec le même facteur de réflexion que le miroir étudié.

D'autres mesures, purement géométriques, ont été faites afin de contrôler les écarts entre les courbures obtenues et les courbures théoriques. Ce contrôle est fait en mesurant au théodolite le déplacement angulaire de l'image, visée dans le miroir, d'un point de repère à l'infini. Ces mesures géométriques seront

poursuivies afin de préciser la meilleure répartition à donner aux points de poussée ou de traction sur la surface du miroir.

A partir de calculs développés dans une précédente étude, concernant la répartition de l'énergie solaire au foyer de miroirs paraboliques supposés géométriquement parfaits, on peut estimer les températures qui pourront être atteintes avec l'installation projetée.

Les deux réflexions successives, sur l'héliostat et sur le miroir courbé, et l'absorption dans l'épaisseur du verre font perdre 39 p. 100 de l'énergie solaire incidente; en tenant compte de cette perte d'énergie

et du facteur d'efficacité de 65 p. 100, la densité énergétique au foyer de l'installation projetée peut atteindre 1 700 watts/cm<sup>2</sup>. La température du corps noir ayant une radiance totale de 1 700 watts/cm<sup>2</sup> est de 3 900 °C; cette température ne serait atteinte, bien entendu, que dans le cas d'un récepteur idéal, c'est-à-dire d'un disque dont la face avant serait parfaitement noire, et la face arrière parfaitement polie.

Dans le cas d'un disque rayonnant également par ses deux faces, la température d'équilibre serait de 3 200 °C environ.

## STUDY OF THE ENERGY CONCENTRATIONS YIELDED BY VERY LARGE PARABOLIC MIRRORS

### Summary

The development of parabolic reflectors of very large surface demands a search for simple and economic techniques; the parabolic mirror will be composed of a large number of elementary facets. The present study relates to a method of making curved facets. This method utilizes the elasticity of glass.

The specific case under study is that of mirrors of hardened glass, silvered on the rear face, from 2 000 to 2 500 cm<sup>2</sup> in area, designed to serve as the elementary facets of a parabolic reflector of 18 m focal length. The total area of this solar installation, now under construction, will be such as to make a thermal power of 1 000 kW available in the focal volume. This prediction is made after allowing for the various causes of energy losses, assuming the intensity of incident solar radiation to be 0.1 watt/cm<sup>2</sup>, the normal level at Mont-Louis.

The curvature of the elementary mirror is obtained by elastic deformation under mechanical stress. Eight adjusting screws exert pressure on the periphery and on the rear surface of the mirror, while, tension is applied at the same time at four central points.

Tests have been run to determine the efficiency of facets curved by this method; the mirror under study is placed at a point of the parabola of 18 m focal length, and receives, on a path parallel to the axis of the parabola, the radiation reflected by a heliostat. The curvature is regulated by visual observation of the shape and dimensions of the light spot formed on the focal plane. Two thermopiles permit the simultaneous measurement of the intensity of the radiation received by the curved mirror and of that received at various points of the focal plane.

These tests were made by placing the elementary mirror at various points of the parabola.

The energy densities obtained were 65 per cent of those that would have been given by strictly parabolic facets of the same area, with the same reflection factor as the mirror under study.

Other measurements, purely geometrical, were made to check the discrepancies between the actual curvatures obtained and the theoretical curvatures. This check was performed by measuring, with a theodolite, the angular displacement of the mirror image of a control point at infinity. These geometrical measurements were undertaken to determine the optimum distribution to be assigned to the points of pressure or tension on the surface of the mirror.

Starting from the calculations developed in an earlier study on the distribution of solar energy at the focus of parabolic mirrors assumed to be geometrically perfect, the temperatures attainable with the projected installation can be calculated.

The two successive reflections, once on the heliostat and once on the curved mirror, and the absorption in the interior of the glass, cause a loss of 39 per cent of the incident solar radiation. Taking account of this energy loss, and assuming the efficiency to be 65 per cent, the energy density at the focus of the installation will reach 1 700 watts cm<sup>2</sup>. The temperature of a black body with a total radiancy of 1 700 watts cm<sup>2</sup> is 3900°C. This temperature, of course, will be attained only with an ideal receiver, i.e., a disk with its front face perfectly black and its rear face perfectly polished.

In the case of a disk radiating equally from both its faces, the equilibrium temperature will be about 3200°C.



## CHEMICAL SYNTHESSES IN THE SOLAR FURNACE

Rudolph J. Marcus and Henry C. Wohlers \*

The solar furnace is usually considered to be a heat source or, more accurately, a heat concentrator. A more meaningful concept is that the solar furnace is a radiation concentrator which concentrates the sun's rays into a small area. A rather high temperature is attained when a black body intercepts these rays; this is the usual situation in a solar furnace. However, the radiation concentrated by the furnace covers the whole range of the solar spectrum as received at the earth's surface (0.3 to 2  $\mu$ ). The shorter wavelengths of this range (0.3 to 0.8  $\mu$ ) constitute ultraviolet and visible light, so that it is equally sensible to speak of the solar furnace as a light concentrator. The use of concentrated light in the solar furnace is made possible by selective absorption. The difference between black-body absorbers and selective absorbers is the temperature they develop; these can be as high as 3200°C for the black body absorber and as low as -10°C for the liquid selective absorbers we use.

A test reaction used to demonstrate the feasibility of this technique was the photo-reduction of ceric perchlorate as it proceeds in the solar furnace. The conclusion was reached that the reaction has the same characteristics with this light source as it has with artificial light sources but that the yield is much greater. For instance, in a typical experiment about 200 ml of oxygen were evolved in 30 minutes, an improvement by a factor of  $10^6$  over that obtained with unconcentrated light (1).

The furnace used for experiments described here is a two-foot-diameter paraboloid on a telescope-type mount (2). It can be operated easily by one man and is the kind of imaging device which can be used with any light generator. The paraboloid is front-surfaced, so that it concentrates the complete solar spectrum on the earth's surface.

The source of the light which is absorbed and used photochemically is the focal spot, which is inside the container in which the reaction is taking place. For this reason, we have called this light source an *in situ* light source. It differs from ordinary light sources used for photochemical reactions in the distance between source and absorption. This distance is appreciable in all artificial light sources, which are thus subject to inverse square losses in intensity, but it is zero in *in situ* light sources. Furthermore, in most photochemical production processes, the waste heat from the artificial light source,

amounting to more than 80 per cent of the power input, is absorbed by the reaction mixture and must in many cases be removed from the reaction by refrigeration. This is a problem which can be solved by use of *in situ* light sources.

This photochemical technique can be extended to use light other than sunlight. For artificial light, such as is generated by a carbon arc, an arc-image furnace is used. For other kinds of light, arc-image principles are used in placing the artificial light source arbitrarily far away in space from the concentrating mirror. Whether one uses sunlight or artificial light, however, the *in situ* light source is a new technique.

We have applied this technique to various energy storing reactions. These studies are described in another paper of this Conference.<sup>1</sup> The advantages of the *in situ* light source, however, also make it attractive as a light source for various photochemical production processes. In an attempt to gauge the usefulness of the device, five different kinds of photochemical reactions were performed in the solar furnace. These are described in succeeding sections.

### Flow systems in the solar furnace

It is desirable to conduct any production process continuously. A photochemical process is particularly adaptable to continuous production techniques because the act of light absorption itself is quite short-lived and the follow-up reactions, concerned with atomic rearrangements, are much slower and can take place in the dark. We have therefore developed flow techniques which move absorbing molecules rapidly past the focal spot of the solar furnace.

Advantages of a flow system for photochemical reactions are obvious. If the reacting solution (or gas) can be pumped quickly through the highly concentrated light at the focus of a solar furnace, the extent of the reaction can be controlled by the residence time in the focus. Further, the rate of a reverse reaction is drastically minimized if one product is removed from the system. Swift passage of the material through the focus reduces the unwanted decomposition of light- or heat-sensitive chemicals.

Another advantage is the large reduction in capital costs for heat transfer equipment in commercial installations. Because the residence time of the

\* Chemistry Department, Stanford Research Institute, Menlo Park, California.

<sup>1</sup> Paper G/2, in vol. 1 of these *Proceedings*, under agenda item II.D.2.

solution in the focus of the solar furnace can be short, heating is minimized and the cooling system, if required, will be small.

We have constructed various flow systems which allowed the reactant molecules only limited time in the focal spot of the two-foot-diameter, front-surfaced parabolic mirror. The residence time is controlled by using a direct pumping system to feed a reactant solution through a small insolation cell (3). Figure 1 shows this system in operation, and a detailed picture of the insolation cell is shown in figure 2.

### Photochemical syntheses

We have used these and earlier versions of reaction cells containing the focal spot of the solar furnace in order to carry out the photochemical syntheses described in the following paragraphs.

#### HALOGENATION REACTIONS

One obvious use of *in situ* light sources is to create a high concentration of halogen atoms. While halogenation is done industrially more often thermo-

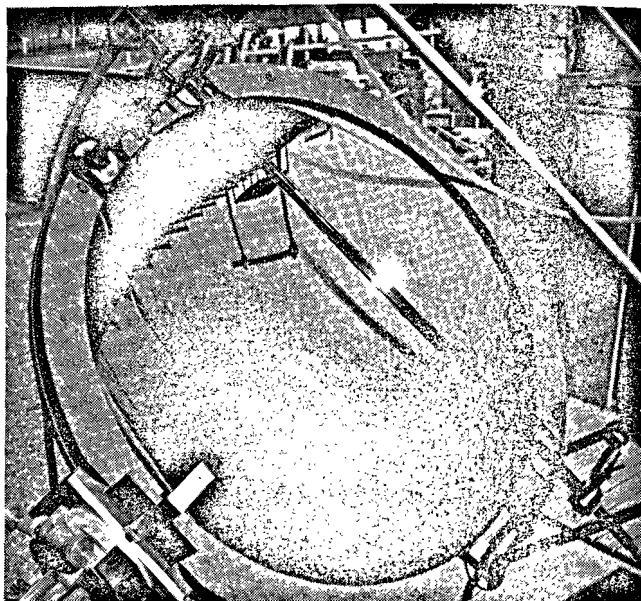


Figure 2. Insolation cell in operation.  
(Photograph taken at  $f$  32,  $1/400$  sec)

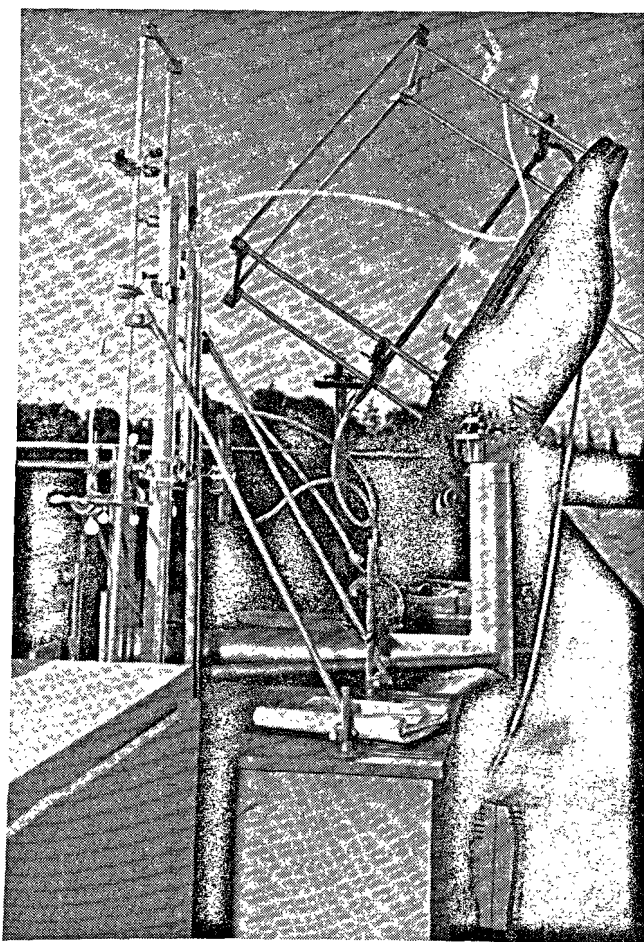


Figure 1. Direct pumping system which feeds reactant solution into solar furnace. The focal spot can be seen at the center of the quartz tube which extends across the mirror

chemically than photochemically, controlled distribution of the products can be achieved only photochemically. For instance, in the production of benzene hexachloride, the proportion of the desired  $\gamma$ -isomer in the product increases at lower temperatures, reaching a maximum at  $-40^{\circ}\text{C}$ .

We have found that sunlight can initiate the chlorination of benzene, even in the presence of oxygen. For instance, a solution containing 2.8 per cent chlorine in benzene was exposed to diffuse sunlight at ice temperature for 2 hours; it yielded 3.3 grams benzene hexachloride per 100 ml benzene, demonstrating 100 per cent conversion of chlorine. Infrared analysis showed that the product was pure benzene hexachloride (18 per cent  $\gamma$ -isomer) and that the ratio of alpha to gamma isomer was in the expected range.

We have also performed the chlorination of benzene in the solar furnace. For instance, a 5 per cent solution of chlorine in benzene was irradiated for different lengths of time in the solar furnace. The yields of benzene hexachloride in grams of benzene hexachloride per 100 ml of benzene were 5.7, 6.0, and 5.7 per cent for irradiation times, respectively, of 30, 15, and 5 minutes. Infrared analysis showed that the product was pure benzene hexachloride (17 per cent  $\gamma$ -isomer) and that the ratio of alpha to gamma isomers was in the expected range.

The *in situ* light source is a cool source of light for the production of benzene hexachloride. By circulating ice water through the illumination cell in the furnace, we have been able to keep the product at about  $10^{\circ}\text{C}$ . The circulation of other cooling agents, such as dry ice and acetone, would allow us to perform the irradiation at very much lower temperatures. The independence of yield with respect to irradiation



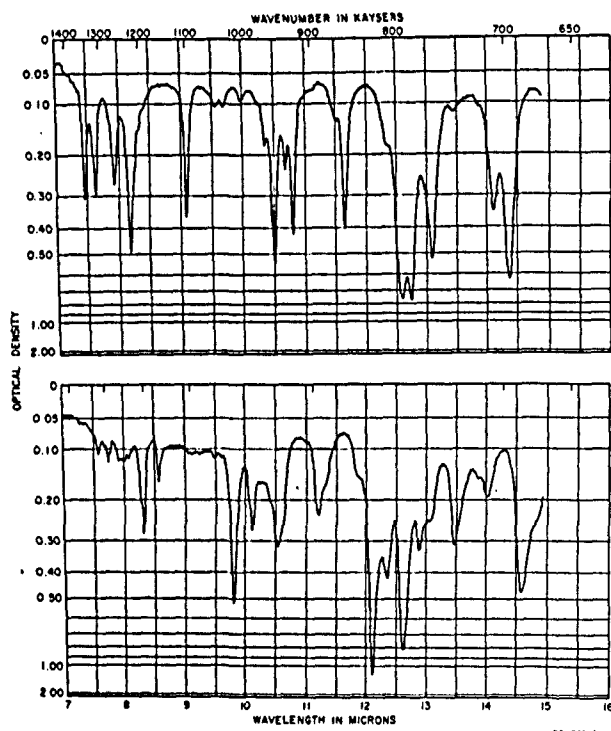
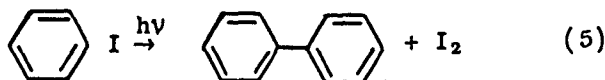


Figure 4. Infrared spectra of  $\alpha$ -benzene hexachloride and chlorine in carbon tetrachloride (upper curve) and of same solution after irradiation in solar furnace (lower curve)

in the system, both as initiators and as products of the initiation reaction. One example of such photopolymerization is the production of polyphenyls.

In our experiments, approximately 50 ml of phenyl iodide were placed at the focus of the two-foot solar furnace. An iodine color appeared within 10 seconds. The formation of biphenyl and iodine was confirmed by gas chromatographic analysis of the products, which showed that 0.3 per cent by weight of biphenyl was formed versus 0.2 per cent calculated from iodine liberation.



Similarly, diiodobenzene in benzene at the focus of the two-foot-diameter solar furnace gave an iodine color after a one-minute exposure. A more extended run with periodic removal of iodine by thiosulfate resulted in about 50 per cent reaction as measured by iodine liberation. About half of the product was biphenyl; a smaller portion had an infrared spectrum similar to that of *p*-quaterphenyl. Similar syntheses have been performed with the 2 537 Hg line (11).

Similar experiments completed in closed systems under argon indicated that oxygen was probably not a factor in a chain-stopping mechanism. Rather, the reaction probably slows down when the light absorption by the product iodine becomes appreciably greater than light absorption by the reactant diiodo-

benzene, which has an extinction coefficient of 13 at 3 550 Å.

#### PHOTOOXIDATION OF ORGANIC COMPOUNDS

A photoproducted organic radical may oxidize by a chain mechanism in the presence of oxygen. Formation of the radical is photo-induced by a light absorber in the system. The advantage over chemical production of the free radical is a minimum of side reactions which may be induced by products of nonphotochemical initiation steps. Furthermore, illumination sets up a photostationary state, continually starting new reactive chains.

For instance, gaseous chlorine was passed into *p*-xylene. The color of the resulting canary-yellow solution disappeared within one minute in the un-concentrated light. In order to slow the reaction down, xylene vapor and air were passed with small amounts of gaseous chlorine to a photochemical reactor. This experiment was run with mixed xylenes for 220 minutes in sunlight. Dense aerosol was formed in the reaction flask about 10 minutes after the start of the test.

About one-third of the product was extractable by both sodium hydroxide and sodium bicarbonate. This indicates that the product contained organic acids but not hydroperoxides. The neutralization equivalent of the acid fraction of the product was 135. The neutralization equivalent of toluic acid would be 136. Elemental analysis showed 61.7 per cent C, 5.23 per cent H, and 9.55 per cent Cl. The data indicate that the acid fraction contained toluic and phthalic acids, some of which were chlorinated.

#### Economics of photochemical syntheses

Very little work has been done on the economics of solar energy, and almost none on the economics of photochemical syntheses. If the quantum yield of the reactions discussed in the previous section were known under operating conditions, it would be reasonably easy to determine plant costs, operating costs, amount of light available, and amount of product made, and thus to calculate the cost of the photochemical product. This cost might then be compared with the cost of the same product when produced thermochemically and with the resultant price at the place where it could be produced photochemically. These two, it should be realized at the outset, need not be the same; it is quite possible that photochemical production plants might be set up in locations where thermochemical plants cannot exist. This would result in price and use differentials for the same product, made by the two different methods.

What we can do as a first step is to compare the different production methods in terms of the number of steps required by each. First, however, we have to determine the amount of light energy which we have available and what fraction of this is useful for production purposes.

## LIGHT BUDGET

We have reported previously on spectral measurements of the focal spot of our five-foot-diameter solar furnace. The concentrating mirror of that furnace is back-silvered, so that its ultraviolet cut-off is 3500 Å. With this exception, the spectrum of the focal spot of the furnace is the same as that of unconcentrated sunlight at the earth's surface (12).

These spectral measurements also allowed us to calculate the total amount of radiation present in the focal spot of the furnace. This amount is 204 watts. The comparable figure for our two-foot-diameter furnace is 49 watts.

The reactions which we have described in the previous section are all initiated by chlorine atoms. These are formed by the interaction of light with either chlorine or nitrosyl chloride. If we compare the action spectrum of chlorine or nitrosyl chloride with the spectrum of the focal spot, we will find that fraction of the solar spectrum which is effective in dissociating chlorine or nitrosyl chloride to form chlorine atoms. These fractions show that in the five-foot-diameter furnace, 38 watts are available for dissociating chlorine and 75 watts for dissociating nitrosyl chloride. In our two-foot-diameter furnace, 10 watts are available for dissociating chlorine and 19 watts for dissociating nitrosyl chloride.

## MOLECULAR BUDGET

The quantum yield of the reaction whose economics are under consideration will determine the through-put which can be achieved. The quantum yields of chlorination reactions are high, as they are for most photochemically induced chain reactions. For instance, the quantum yield for the chlorination of benzene to form benzene hexachloride can be as high as 5 000 in the absence of oxygen. Combining this figure with the 10 watts of light which are available for chlorination in our two-foot-diameter furnace, the maximum production of benzene hexachloride in this furnace would be 0.2 moles per second, or 3 680 pounds per eight-hour day.

The through-put which can be calculated from quantum yields is important because it is an indication of the use factor of the photochemical equipment. If a single piece of apparatus is required for both photochemical and thermochemical production of the same product from the same reactants, then the cost of the product made by these two methods

will be the same if the cost of the equipment, the through-put, and the yield for these two methods are the same. The photochemical product will be cheaper than the thermochemical product if the photochemical apparatus (the solar furnace) is cheaper than the corresponding thermochemical apparatus (for instance, an autoclave of the same capacity) or if the through-put or yield are higher for the photochemical method than they are for the thermochemical method.

This case represents one extreme in which we consider only a single piece of apparatus and find that the cost in this case is governed primarily by the quantum yield.

## EQUIPMENT BUDGET

Let us now consider a case in which the number of production steps is greater for thermochemical production than it is for photochemical production. Cyclohexanone oxime can be prepared photochemically from cyclohexane and nitrosyl chloride in one step. It is usually made thermochemically from cyclohexane in at least two steps. The first step is the air oxidation of cyclohexane to form cyclohexanone, in which the average yield is only about 55 per cent. This low yield often causes the use of other multi-step processes for the production of cyclohexanone. The second step is the reaction of cyclohexanone with hydroxylamine to form cyclohexanone oxime.

Here the thermochemical production involves at least two steps, each with a reactor and associated equipment, and also an intermediate product isolation and purification. The photochemical production, by comparison, involves only a single step with a single reactor and avoids an intermediate product isolation and purification.

Thus the photochemical production saves a considerable capital equipment cost and processing cost. This saving must be balanced against the cost of the photochemical reactor.

## CONCLUSION

In discussing the economics of photochemical syntheses, we have talked about the following variables, each of which must be compared for the corresponding thermochemical and photochemical processes: raw materials, yield, through-put, apparatus cost, and number of production steps.

## References

- Marcus, R. J. and Wohlers, H. C., *Ind. Eng. Chem.* **51**, 1335 (1959).
- Ibid.* **52**, 825 (1960).
- Marcus, R. J. and Wohlers, H. C., *Solar Energy* (in press).
- Naylor, M. A. and Anderson, A. W., *J. Org. Chem.* **18**, 115 (1953).
- Lynn, E. V., *J. Am. Chem. Soc.* **41**, 368 (1919).
- Lynn, E. V. and Hilton, O., *J. Am. Chem. Soc.* **44**, 645 (1922).
- Lynn, E. V. and Arkley, H. L., *J. Am. Chem. Soc.* **45**, 1645 (1923).
- Aikawa, K. and Ito, M., *Japan* 5016 (1933).
- Svit, narodni podnik. *Austrian* 172, 618 (1932).
- Aparisi, R. R., Strel'tsova, A. A. and Carl, B. A., *Troisik Akad. Nauk S.S.S.R.* **30**, No. 10, 67 (1960).
- Wolf, W. and Kharasch, N., *J. Org. Chem.* **26**, 243 (1961).
- Marcus, R. J. and Wohlers, H. C., *Ind. Eng. Chem.* **52**, 377 (1960).

### Summary

The solar furnace has been used as a concentrated light source as well as a heat source. When used with the flow equipment described in this paper, this light source requires little or no refrigeration. The following reactions have been performed in the liquid phase: photochlorination of benzene to give benzene hexachloride, photosensitized oxidation of xylene to give various phthalic acids, formation of cyclohexanone oxime from cyclohexane photo-sensitized by nitrosyl chloride, photopolymerization of iodobenzene to form biphenyl and higher polymers, and the perchlorination of benzene to form compounds containing more than six chlorines. These reactions were initiated by chlorine atoms arising from the photolysis of chlorine or of nitrosyl chloride in the solar furnace.

The spectral distribution of our five-foot-diameter furnace has been measured; 204 watts are available at its focal point. Of these, about 38 watts are in the spectral range effective in dissociating chlorine and 75 watts are in the spectral range effective in dissociating nitrosyl chloride. The corresponding figures for our two-foot solar furnace are 49 watts of light, 10 watts effective in dissociating chlorine and 19 watts effective in dissociating nitrosyl chloride.

At a quantum yield of 5 000 in the absence of oxygen, this would mean a maximum production of 0.2 moles/sec of benzene hexachloride or

3 680 lb/8-hr-day in a two-foot furnace. The  $\gamma$ -isomer content (used as an insecticide) of the material is the usual 18 per cent; this could be increased to 29 per cent by the use of solvents. This method of production avoids the heat load (about 80 per cent of the power input) associated with the usual immersion-type quartz lamps and eliminates expensive refrigeration which would otherwise be required to remove this heat load. Arc-image furnaces can be used for 24-hour production with similar advantages.

The economics of caprolactam production (photochemical production of nylon-6 monomer from cyclohexane in one step) seem to be quite favorable. While no exact figures can be quoted because optimum yields have not yet been determined, the capital cost of photochemical equipment will not be an appreciable part of the production cost of this high price (49c/lb) chemical. In addition, the photochemical production eliminates a large number of manufacturing steps, thereby appreciably reducing the production cost in comparison to thermal, multi-step syntheses of this compound.

The economics of photochemical synthesis involve comparison of the following variables for corresponding thermochemical and photochemical processes: raw materials, yield, through-put, apparatus cost, number of production steps, and plant location.

## SYNTHÈSES CHIMIQUES DANS LE FOUR SOLAIRE

### Résumé

On a fait usage du four solaire non seulement comme source de chaleur, mais aussi comme source de lumière concentrée. Quand elle est utilisée avec le dispositif d'écoulement décrit dans le présent mémoire, cette source de lumière n'exige pour ainsi dire pas de refroidissement. Les réactions suivantes ont été effectuées dans la phase liquide: fixation photosynthétique du chlore au benzène pour donner de l'hexachlorure de benzène, oxydation photosensibilisée du xylène pour donner divers acides phtaliques, formation d'un oxyme de cyclohexanone à partir d'un cyclohexane photosensibilisé par le chlorure de nitrosyle, photopolymérisation du iodobenzène pour obtenir du diphenyle et des polymères d'ordre plus élevé, et enfin perchloration du benzène pour former des composés comportant plus de six atomes de chlore. Ces réactions ont été amorcées par des atomes de chlore produits par la photolyse du chlore ou du chlorure de nitrosyle dans le four solaire.

On a procédé à la mesure de la répartition spectrale dans notre four de 5 pieds (1,52 m) de diamètre.

On dispose de 204 watts en son foyer. Sur cette puissance, 38 watts sont disponibles dans la gamme spectrale qui est efficace pour la dissociation du chlore et 75 watts se situent dans celle qui est appropriée pour la dissociation du chlorure de nitrosyle. Les chiffres correspondants, pour le four de 2 pieds (0,61 m), sont 49 watts de lumière, dont 10 efficaces pour la dissociation du chlore et 19 pour celle du chlorure de nitrosyle.

Avec un rendement quantique de 5 000 en l'absence d'oxygène, ceci équivaldrait à une production maximum de 0,2 mols/sec d'hexachlorure de benzène ou 3 680 livres par journée de 8 heures dans le four de 2 pieds. La teneur en isomère  $\gamma$  (utilisé comme insecticide) est de 18 p. 100 comme de coutume, mais on pourrait la porter à 29 p. 100 en se servant de certains solvants. Cette méthode de production obvie au besoin d'apport de calories (80 p. 100 environ de la puissance fournie), dont s'accompagne l'emploi de la lampe en quartz à immersion du type classique, et élimine le système coûteux de refroidissement qui serait autrement requis pour dissiper une

telle charge. On peut se servir de fours à image d'arc qui produisent 24 heures par jour, avec les avantages que ceci comporte.

Les aspects économiques de la production du caprolactam (par synthèse photochimique du monomère de nylon-6 à partir du cyclohexane en une seule opération) semblent très attrayants. Bien qu'il soit impossible de mentionner des chiffres exacts parce que les rendements optimum n'ont pas encore été déterminés, l'investissement initial qui s'impose pour le matériel photochimique ne constituera pas une fraction importante du coût de production de ce produit chimique cher (0,49 dollar la livre).

La production photochimique, au surplus, élimine plusieurs des opérations qui interviennent normalement dans la fabrication, ce qui réduit sensiblement les frais de production par rapport à ceux qui correspondent aux synthèses thermiques à stades multiples dont on doit se servir avec ce composé.

Les considérations économiques applicables aux synthèses photochimiques font intervenir une comparaison des variables suivantes pour les processus thermochimiques et photochimiques correspondants : matières premières, rendement, débit, prix des appareils, nombre des opérations de production et emplacement de l'usine.

## APPLIED RESEARCH IN A SOLAR FURNACE

Tetsuo Noguchi, Masao Mizuno,  
Noburu Nakayama and Hiroshi Hayashi \*

Recently the use of a solar furnace in engineering research has been considerably developed in the very high temperature region. This may be attributed to the following reasons: high temperatures of more than 3000°C can easily be obtained in a short time, and a specimen can be heated in a pure and selected atmosphere without contamination.

The intense heat flux obtained at the focal point of a solar furnace depends primarily upon the geometrical perfection of the reflector and upon other design problems, such as the accuracy of the guiding system and target positioning, the shadowing loss

factor, the reflectivity of the mirror, etc., and also on the intensity of solar radiation. Most of these factors affect the performance data of a solar furnace, and the target holding system and atmosphere used in practical experiments vary according to the purpose of the study.

To develop techniques of target positioning and atmosphere control in a solar furnace for fusion study and property measurements at high temperatures, a continuous vacuum fusion apparatus has been designed by the authors in combination with a heliostat type solar furnace.

In this furnace (1) a surplus searchlight mirror of 150 cm in diameter is used as a paraboloidal

\* Government Industrial Research Institute, Nagoya, Japan.

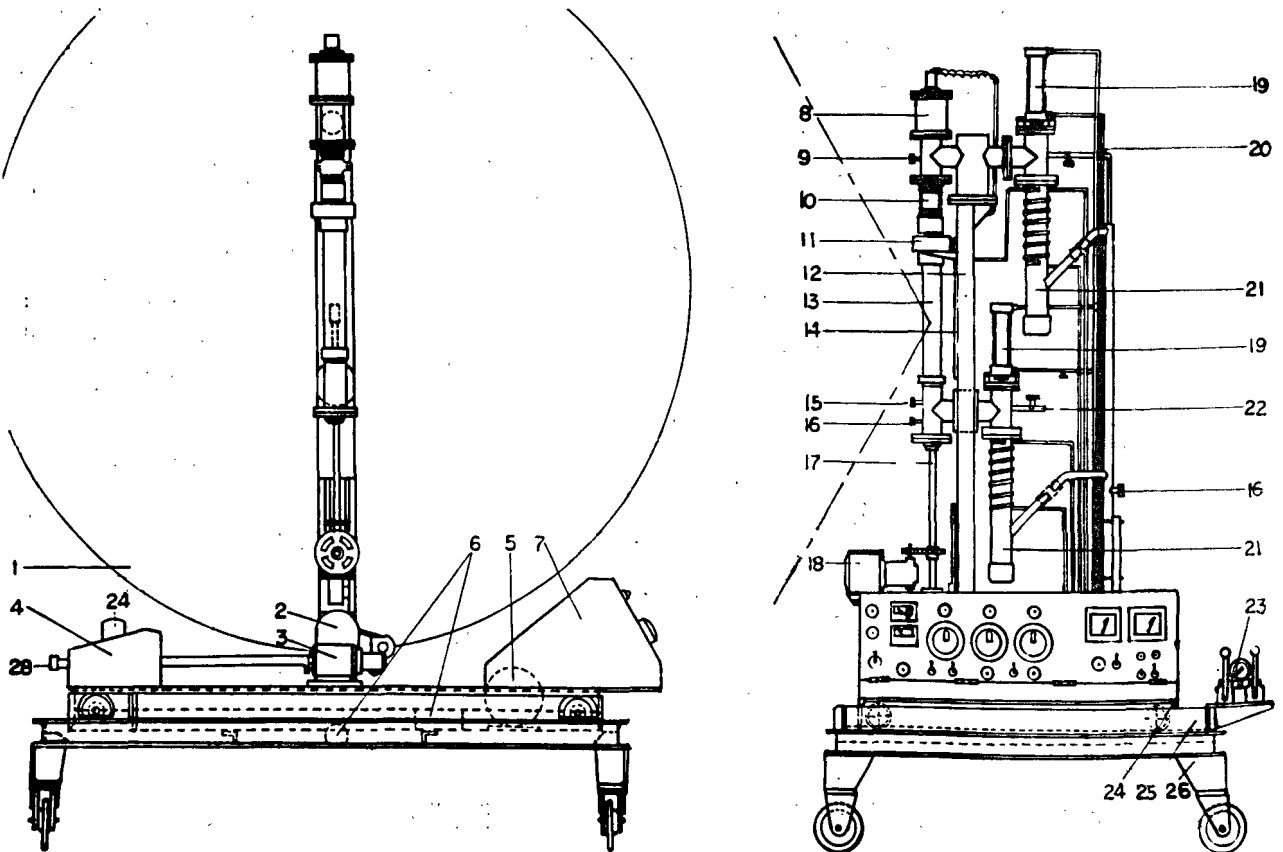


Figure 1. Layout of the continuous vacuum fusion apparatus

1. Paraboloidal mirror, 2. Gear box, 3. 1/16 HP dc motor, 4. Switchboard, 5. Hydraulic pump, 6. Hydraulic ram, 7. Control panel,
8. Upper feeder, 9. To Phillips gauge, 10. Bellows, 11. Lower feeder, 12. Support, 13. Fused silica tube, 14. Water jacket, 15. To ionization gauge, 16. To Pirani gauge, 17. Sample holder shaft, 18. 1/12 HP dc motor, 19. Pneumatic cylinder, 20. Compressed air piping,
21. Diffusion pump, 22. Gas inlet, 23. Control lever of hydraulic system, 24. Upper stage, 25. Middle stage, 26. Lower stage,
27. Electromagnetic four-way valve, 28. Gas outlet



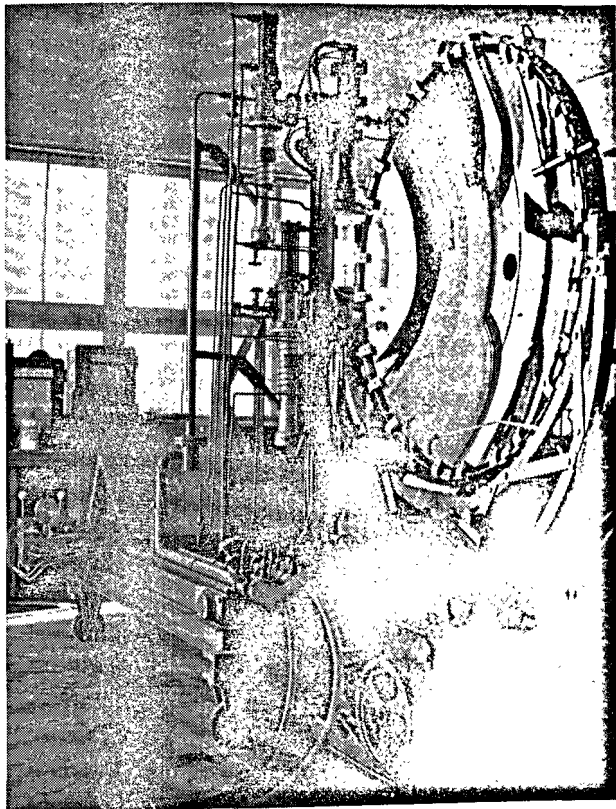


Figure 2. Side view of the installation

reflector (2). The heliostat (3) consists of sixteen segments of  $60 \times 60$  cm aluminum coated front surface mirror. The sun tracking mechanism (4) is composed of four phototubes, servovalves, and hydraulic cylinders. For temperature control, aluminum plates of the venetian blind type are used.

### Continuous vacuum fusion apparatus

In order to study the behavior of high melting ceramics at the focus of the heliostat type solar furnace in a vacuum or a selected atmosphere the

continuous vacuum fusion apparatus was designed. The apparatus itself has no elements for heating the specimen and is used in combination with an optical system of which the axis is horizontal.

Therefore the shadowing parts of the apparatus are arranged parallel to the optical axis of the paraboloid so as to reduce the shadowing loss to within 5 per cent of the effective surface area of the reflector. The front and side views of the apparatus are shown in figure 1 and figure 2.

### ATMOSPHERE CONTROL

The degree of vacuum during the heat treatment of a specimen is specified as  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  mm Hg and the pump unit consists of a rotary pump (1/2 HP, pumping speed 300 l/min) and two diffusion pumps (200 W, pumping speed 110 l/sec each). The rotary pump is detached from the apparatus to eliminate the effect of vibration. A block diagram of the controlling system is shown in figure 3. As there might be some possibility of a break in the vacuum system owing to the collapse of glass tubing near the focus during the heating, fused silica tubing 6 cm in diameter and 30 cm in length is used to ensure safe operation.

The pneumatic valves located between the dust collector and the diffusion pump are operated by compressed air by means of an electromagnetic four-way valve when the difference in pressure between the diffusion pump and the silica tube reaches about 0.3 mm Hg. These valves serve not only to protect the diffusion pump from damage caused by a break in the vacuum system but to close the diffusion pumps in the case of a prompt exchange of the specimen for further operation.

Any selected gas such as hydrogen, nitrogen, argon or helium can be introduced into the apparatus through the gas inlet for purposes of the experiment.

To measure the degree of vacuum a Pirani gauge including a relay which operates by means of a warning signal at 0.3 mm Hg is used from  $100 \cdot 10^{-3}$  mm Hg. An ionization gauge and a Phillips gauge are used in the region of  $10^{-2}$ - $10^{-7}$

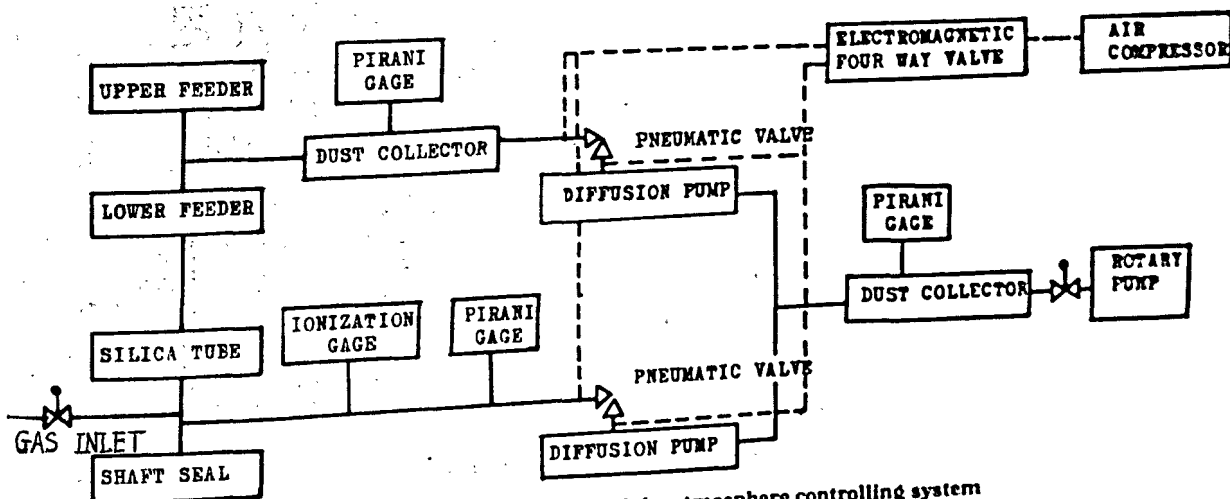


Figure 3. Block diagram of the atmosphere controlling system

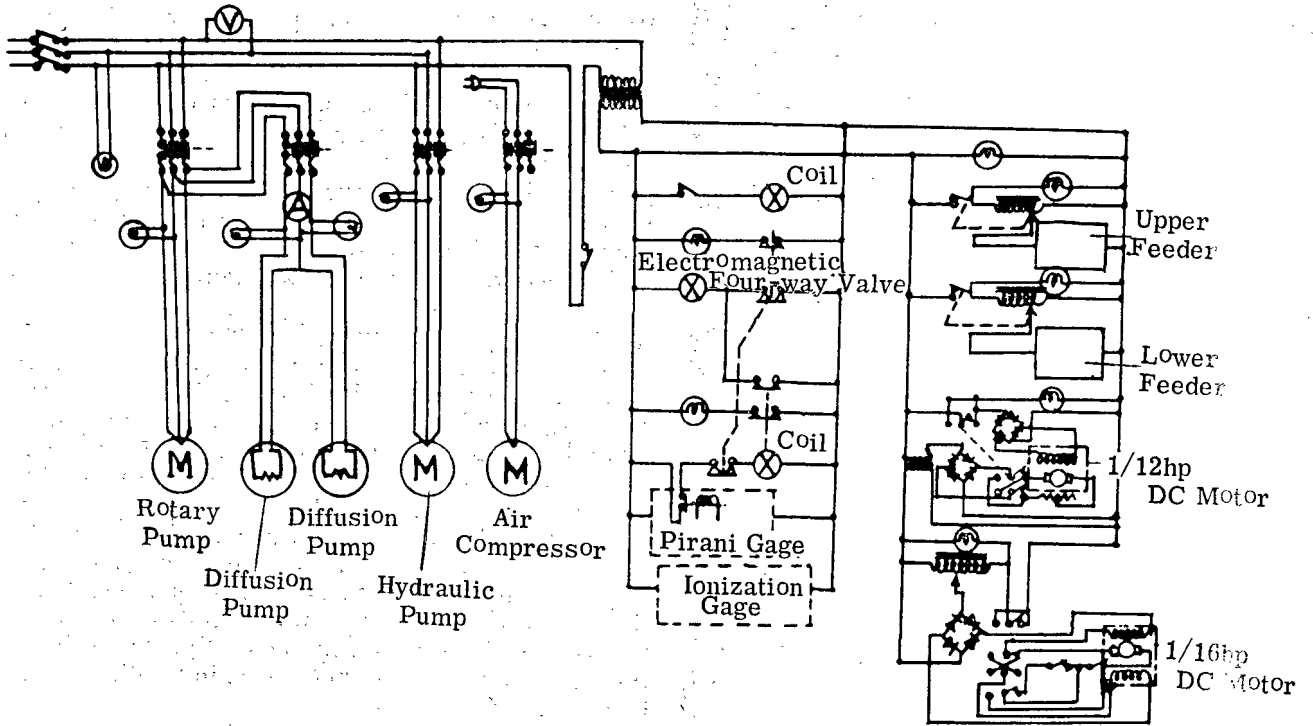


Figure 4. Wiring diagram

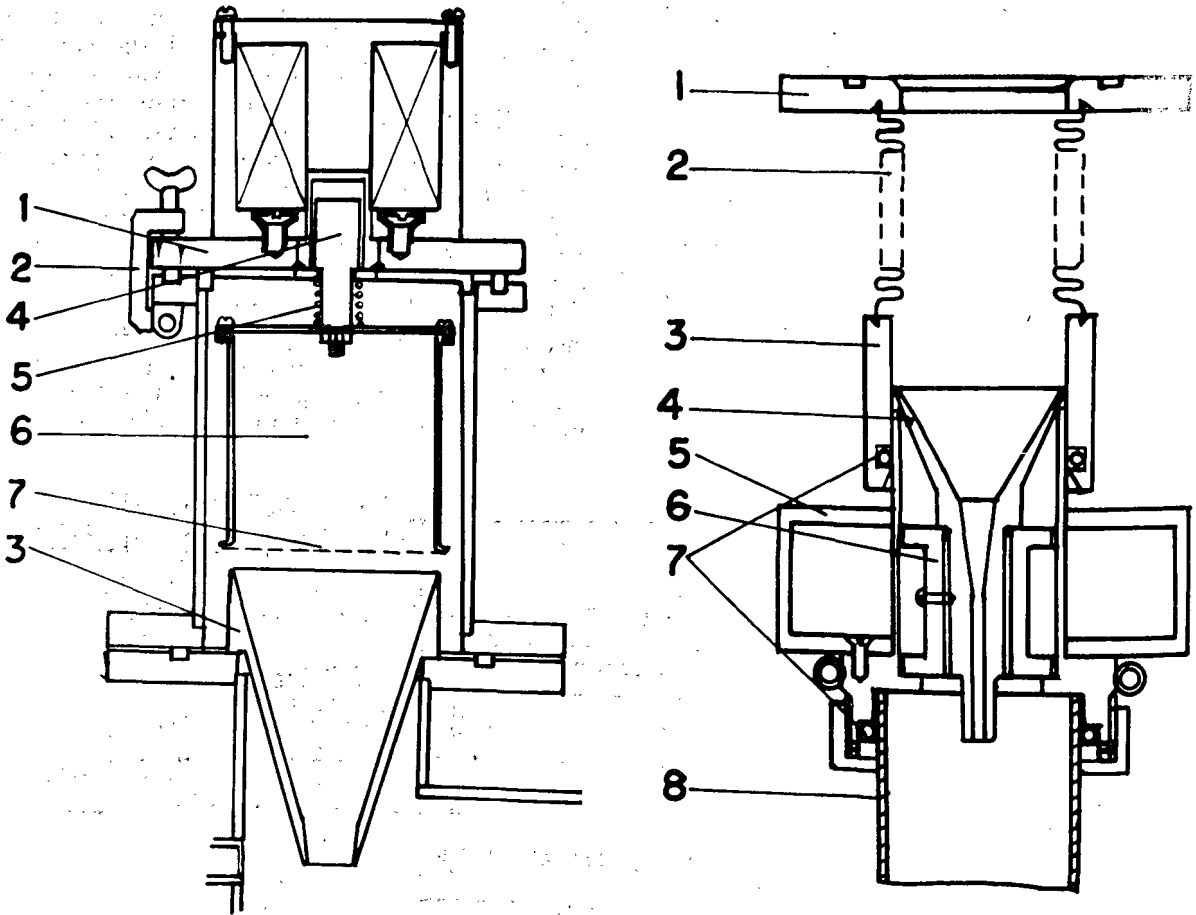


Figure 5. Schematic diagram of the sample feeder

Upper Feeder : 1, flange; 2, clamp; 3, funnel; 4, vibrator; 5, spring; 6, sample container; 7, brass net; Lower Feeder : 1, flange; 2, bellows; 3, O-ring cap; 4, stainless steel funnel; 5, coil cover; 6, vibrator; 7, O-ring cap; 8, silica tube

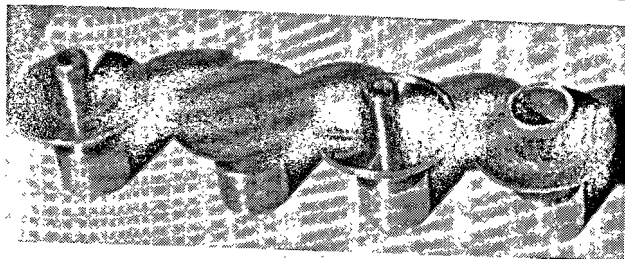


Figure 6. Various sample holders used for powder and rod specimen

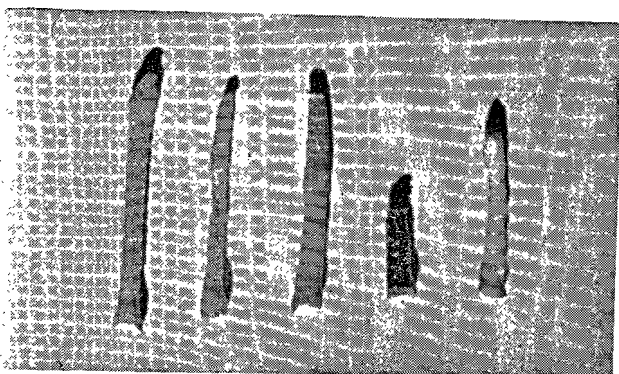


Figure 7. Fused specimens of metal oxides—from left,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (in air),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (vacuum),  $\text{ZrO}_2$  (in air),  $\text{ZrO}_2$  (vacuum), and  $\text{MgO}$  (in air)

mm Hg. Figure 4 shows the wiring diagram of the apparatus.

It should be pointed out that the fusion of a specimen in air is possible either within or without the silica tube and in the case of thermal property measurement the silica tube can be replaced by an instrument casing of metal with a circular window of fused silica plate.

#### TARGET POSITIONING SYSTEM

Since the theoretical image diameter of this solar furnace is 7 mm, it is necessary that the target be placed within 3.5 mm from the focal plane to obtain temperatures within 5 per cent of the maximum attainable temperature (5). Thus a three dimensional minute adjustment is adopted to obtain an accurate target positioning in this apparatus.

The mounting of the apparatus is divided into three stages as shown in figure 1 and the lower stage is wheeled to face to the paraboloidal reflector. The middle and upper stages are driven by a hydraulic device, right and left or backward and forward, with the stroke of 70 mm.

The vertical motion of the target specimen is regulated by a 1/12 HP dc geared motor, and its rate is variable within 10 mm/min. The stroke of the specimen holder is 150 mm.

The specimen holder is rotated at 6-15 rpm by means of a 1/16 HP dc geared motor to the right or left in such a way that the specimen may be

irradiated uniformly by the heat flux. The support behind the silica tube is water cooled to prevent a temperature rise.

#### SAMPLE FEEDING SYSTEM

The original sample feeding system consists of two feeders. The upper and lower feeders are connected by a bellows, and are composed of a stainless steel funnel and a magnetic vibrator respectively. A schematic diagram of the feeders is shown in figure 5.

Sample powder of 150-200 mesh, dried previously in a vacuum, passes through the brass net of the upper feeder and drops continuously through the funnel of both feeders to the pan of the sample holder shown in figure 6. The feeding rate of the sample can be varied by changing the input to the magnetic vibrator.

For a rod specimen, specimen holders of a different diameter have been designed and the above feeding mechanism is replaced by ascension of the specimen.

#### Fusion of metal oxides

Using this apparatus, some metal oxides were fused in air and in the vacuum of  $4-5 \times 10^{-5}$  mm Hg. Melts of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$  and  $\text{MgO}$  are shown in figure 7.

In order to produce a molten rod in any atmosphere, the sample feeding rate, revolution of the specimen holder, and intensity of heat flux should be determined experimentally according to the kind and physical properties of each sample. The most suitable size of rod specimen for the operation was about 6 mm in diameter. The center portion of a larger specimen was often found not to be melted. This could be fused by the longer exposure at the focus, but the specimen was liable to melt into a flat mass which was not desirable for any further operation.

When the sample powder or rod specimen was heated on the rotating holder in air, impurities contained were found to be concentrated along the axis of rotation towards the end of the specimen

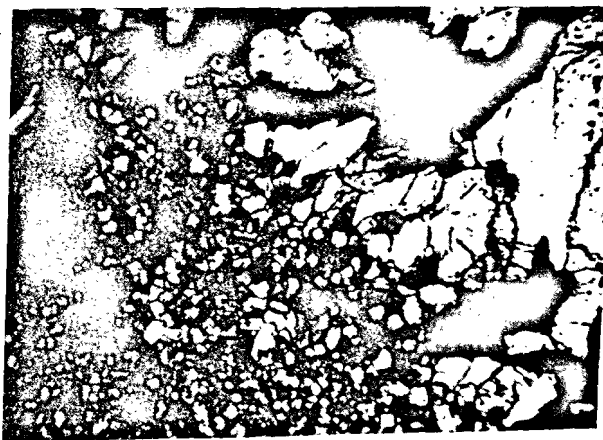


Figure 8. Micrograph of the alumina fused in vacuo —(x50) cross nicol

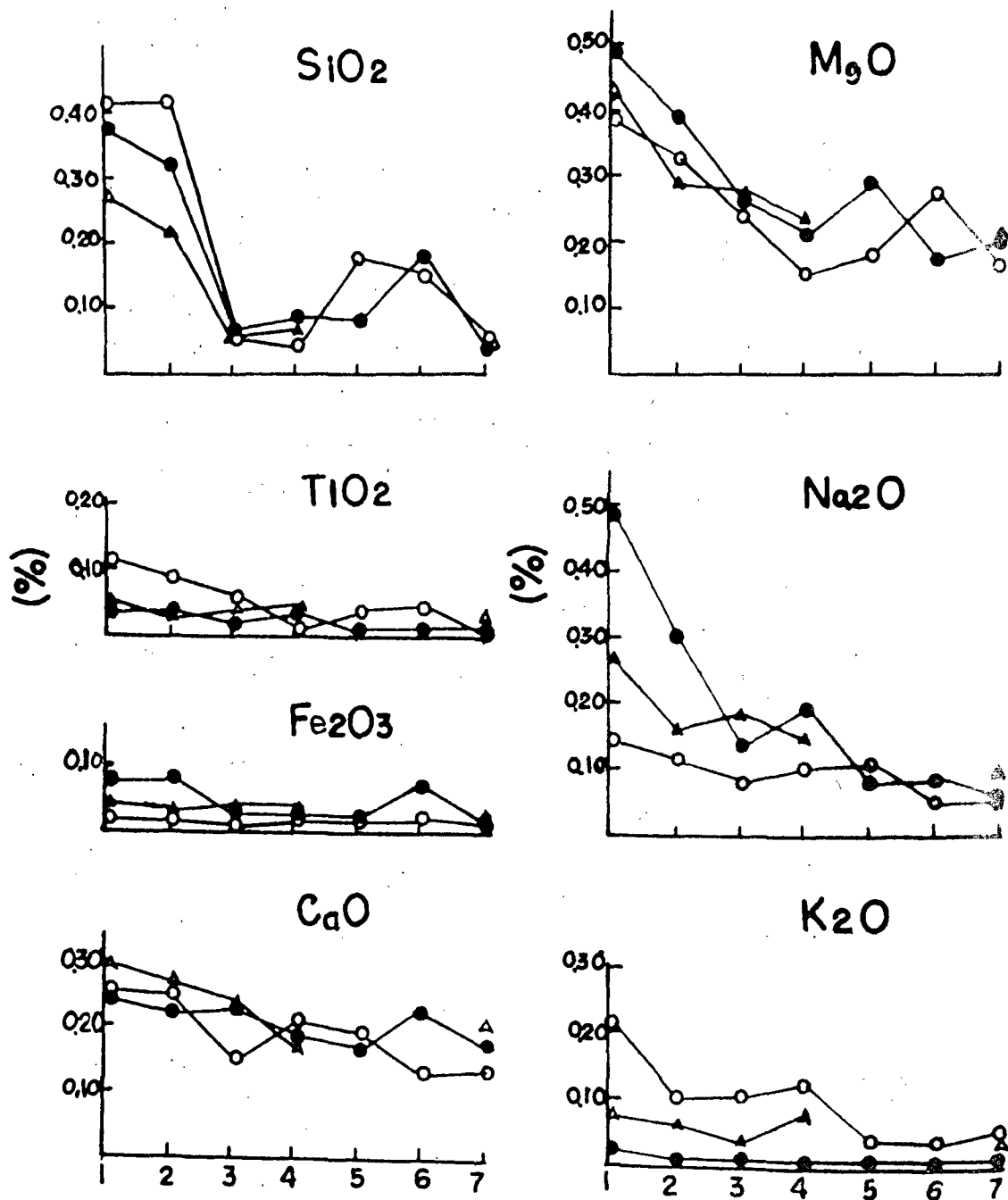


Figure 9. Results of chemical analysis of fused alundum

as a result of zone melting. They also tended partly to vaporize from the surface of the melt. But, in the case of vacuum fusion, a certain amount of the impurities seemed to vaporize rapidly from the melted specimen rather than become concentrated.

Crystal growth was remarkable at the outer edge of the melt rather than in the centre portion in any specimen. A cross section of melted alumina is shown in figure 8. The average size of the alumina

crystal at the outer edge was 0.5 mm or more while that at the center was about 30  $\mu$ . Slight pore formation was observed among the crystals.

No crystallographic change was observable between the oxides melted in air and those *in vacuo* with the exception of alumina in the microscopic observation and X-ray analysis. ZrO<sub>2</sub> gave a black monoclinic crystal by vacuum fusion and  $\beta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contained in the alundum was not found in the melted specimen. A very small quantity of crystals deposited on the

inside wall of the silica tube in the vacuum fusion of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  were found by X-ray analysis to be MgO and MgO.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

### Purification of alumina

Thus the purification of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  was studied by melting in air or *in vacuo*. Aluminum oxide prepared by the decomposition of alum and the Bayer process were melted and their impurities were analysed by the following techniques: colorimetric determination by the molybdenum blue method ( $\text{SiO}_2$ ), the hydrogen peroxide method ( $\text{TiO}_2$ ), the *o*-phenanthroline method ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ); the titration method with EDTA (CaO and MgO); and by a flame photometer ( $\text{Na}_2\text{O}$  and  $\text{K}_2\text{O}$ ). The experimental results are shown in table 1 and figure 9.

Table 1 indicates a comparison between the results of fusion of the two kinds of alumina in air and

in the vacuum of  $5 \times 10^{-4}$  mm Hg. A concentration of impurities at the base of the specimen rod was observed in the case of fusion in air and better results were obtained by vacuum fusion than in air for both samples. In this experiment fusion was not repeated more than once. In figure 9 three kinds of alundum were fused by five processes. Before the fusion in air 1 per cent of graphite or chlorides was added to the specimen as a reducer or chlorinator (0). The numbers on the abscissa indicate the following processes: 1—initial sample, 2—sintered at 1500°C, 3—fused in air without an additive, 4—fused in air with 1 per cent of graphite, 5—fused in air with 1 per cent of  $\text{CCl}_4$ , 6—fused in air with 1 per cent of  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , and 7—fused in a vacuum.

Traces of impurities were difficult to eliminate by any of these methods; however, significant differences between the five processes appeared in the elimination of  $\text{SiO}_2$ , MgO and  $\text{Na}_2\text{O}$ .

Table 1. Chemical analysis data of fused alumina

	Alumina decomposed from alum with 5% of feldspar				Bayer process alumina			
	Initial sample	Vacuum fusion	Fusion in air		Initial sample	Vacuum fusion	Fusion in air	
			Top	Base			Top	Base
$\text{SiO}_2$ . . .	1.23	1.01	0.95	1.18	0.98	0.43	0.81	1.39
$\text{TiO}_2$ . . .		0.05	0.42	0.69	0.20	tr.	0.74	
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ . .	0.18	0.06	0.12	0.18	0.89	0.52	0.82	1.02
MgO . . .	0.89	0.07	0.79	1.27	0.68	0.43	0.62	0.71
CaO . . .	1.00	0.60	0.71	1.17	0.33	tr.	tr.	0.37
$\text{Na}_2\text{O}$ . . .	0.63	0.31	0.60	0.80	0.18	0.10	0.13	0.19
$\text{K}_2\text{O}$ . . .	2.21	1.13	1.86	2.51	0.15	0.06	0.08	0.13

### References

1. Noguchi, T., Solar Furnace Research in Japan, *Journal of Solar Energy Science and Engineering* 3: 44-6, 1959.
2. Fukuo, N., Kozuka, T., Fujishiro, I. and Yoshida, M., Heliostat-Type Solar Furnace (III), *Reports of Gov't. Ind. Res. Institute, Nagoya* 8: 173-81, 1959.
3. Fukuo, N., et al., Heliostat-Type Solar Furnace (II), *Reports of Gov't. Ind. Res. Institute, Nagoya* 8: 166-72, 1959.
4. Fukuo, N., et al., Automatic Sun-Tracking System of a Heliostat-Type Solar Furnace, *Reports of Gov't. Ind. Res. Institute, Nagoya* 8: 467-81, 1959.
5. Rue, R.D.L., Jr., Loh, E., Brenner, J. L. and Hiester, N.K., Flux Distribution Near the Focal Plane, *Journal of Solar Energy Science and Engineering*, 1:94-8, 1957.
6. Trombe, F. and Foëx, M., Sur le Corindon Pur Fondu au Four Solaire, *Bull. Soc. Franc. Ceram.* 43: 69-79, 1959.

### Summary

Vacuum fusion of high melting ceramic oxides was performed by a heliostat type solar furnace to study the behavior of metal oxide at high temperature in a vacuum.

In this solar furnace a surplus searchlight mirror of 150 cm in diameter was used as a paraboloidal reflector. The heliostat consisted of sixteen segments of 60 × 60 cm aluminum coated front surface mirror. The sun tracking mechanism was composed of four phototubes, servovalves, and hydraulic cylinders.

An apparatus for continuous vacuum fusion of powder material or rod specimens was designed. The specifications of the apparatus are as follows:

Shadowing loss . . . . .	5 per cent
Degree of vacuum . . . . .	10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-5</sup> mm Hg during heat treatment
Pump unit . . . . .	Rotary pump (1/2 HP, pumping speed 300 l/min) and two diffusion pumps (200 W, pumping speed 110 l/sec each)

Fused silica tube . . . . .	6 cm diameter and 30 cm length
Target positioning . . . . .	Three dimensional adjustment by a hydraulic device and a geared motor
Sample feeding . . . . .	By two feeders of stainless steel funnel with a magnetic vibrator or by ascension (10 mm/min) of a rotating specimen holder with the stroke of 150 mm.
Revolution of specimen . . . . .	6-15 rpm by a 1/16 HP geared motor

Any selected gas can be introduced through the gas inlet into the apparatus and a specimen is heated by solar radiation through a fused silica tube at the focus of a heliostat type solar furnace of which the axis is horizontal.

By the use of this apparatus Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, and ZrO<sub>2</sub> were fused in the air or *in vacuo* and purification of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was investigated particularly. It was found that the vacuum fusion of alumina seemed to be effective in eliminating MgO and Na<sub>2</sub>O or K<sub>2</sub>O contained as impurities.

## RECHERCHES APPLIQUÉES DANS UN FOUR SOLAIRE

### Résumé

On a réalisé la fusion dans le vide d'oxydes de composés céramiques à température de fusion élevée, au moyen d'un four solaire du type à héliostat, pour étudier le comportement des oxydes métalliques dans le vide à haute température.

On s'est servi, comme réflecteur parabolique, d'un miroir de projecteur de 150 cm de diamètre. L'héliostat était constitué par seize éléments de miroir de 60 × 60 cm à revêtement d'aluminium et à surface antérieure réfléchissante. Le mécanisme servant à suivre le soleil se composait de quatre tubes photo-électriques, de servo-soupapes et des cylindres de commande hydraulique appropriés.

On a mis au point un appareil permettant de réaliser la fusion continue dans le vide de matériaux en poudre ou de baguettes. Voici les spécifications applicables à ce matériel:

Pertes dues à l'ombre . . . . .	5 p. 100
Degré de vide . . . . .	de 10 <sup>-4</sup> à 10 <sup>-5</sup> de Hg pendant le traitement thermique
Pompes . . . . .	Pompe rotative (1/2 CV, débit 300 l/min) et deux pompes de diffusion (200 W, débit 110 l/s pour chacune)
Tube en silice fondue . . . . .	Diamètre 6 cm, longueur 30 cm

Commande de position de la cible . . . . .	Réglage tridimensionnel au moyen d'un dispositif hydraulique et d'un moteur doté d'un train d'engrenages
Présentation des échantillons . . . . .	Par deux toboggans en acier inoxydable et vibreur magnétique ou par ascension (10 mm/min) d'un porte-spécimen rotatif ayant une course de 150 mm
Rotation du spécimen . . . . .	6 à 15 t/m au moyen d'un moteur à train d'engrenages de 1/16 CV

On peut introduire le gaz choisi par l'orifice d'admission et chauffer le spécimen au moyen du rayonnement solaire dans un tube en silice fondue, au foyer d'un four solaire du type à héliostat dont l'axe est horizontal.

On a pu, au moyen de ce dispositif, assurer la fusion d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO et ZnO<sub>2</sub> dans l'air ou dans le vide. On a plus spécialement étudié la purification de l'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. On a pu établir de la sorte que la fusion de cette alumine dans le vide semblait constituer un moyen efficace d'élimination de la magnésie, ainsi que des oxydes de sodium et de potassium qu'elle peut contenir comme impuretés.

## CONSTRUCTION OF A LARGE SOLAR FURNACE

*Takemaro Sakurai, Koro Shishido, Osamu Kamada and Koji Inagaki \**

A solar furnace is a useful means of attaining high temperatures, and it has various advantages not to be found in other methods. When a paraboloidal mirror is used to bring solar radiation into focus, the total energy is affected by the aperture of the mirror, while the size of the image of the sun is controlled by the focal length. Theoretical considerations show that the temperature attainable at the focal point is dependent on the focal ratio (focal length/aperture). Hence, when the specimen to be heated is very small, a sufficiently high temperature can be attained even by a small mirror, if it has a small focal ratio. For property measurements of materials, however, it is desirable and sometimes indispensable that the area to be raised to a high temperature should have a considerable magnitude, in which case a large focal length is necessary and hence, a large aperture is required to maintain the focal ratio at the same value.

For a small furnace, it is not so difficult to make a paraboloidal mirror, of sufficient accuracy to give a sharp image, from a single blank. In a large furnace, the paraboloidal mirror must be composed of many mirror pieces as obtainable blanks are limited in size. It is very difficult to form the individual mirror pieces into portions of a paraboloid, hence, in the

furnaces hitherto constructed, they have been replaced by surfaces more easily fabricated. Moreover, when the angle of elevation of the plane mirror of the heliostat changes, its frame loses its shape, if it is not properly mounted, thus reducing the parallelism of the radiation. Consequently, the image in a large furnace is not so good as that in a small furnace, and the attainable temperature is decreased if the focal ratio remains the same.

Two years ago, the construction of a large solar furnace was undertaken in our university for the purpose of carrying on basic and applied researches in high temperature physics and chemistry. An aperture as large as 10 m and the highest attainable temperature were required. We were very fortunate in that our laboratory had already been conducting studies in the fabrication of various aspheric optical surfaces for several years. From our experience, it was considered possible to construct a large solar furnace of high efficiency.

### Design of optical system

There are two types of solar furnace; one is that in which the paraboloidal mirror is directed toward the sun, and the other is that in which the paraboloidal mirror is fixed and the radiation is conveyed to it by means of a heliostat. In the latter type, a certain proportion of the radiation is lost by reflection at the heliostat, but it is convenient in that the target need not move and can be placed near by. For measuring the properties of the target, this asset is considered to outweigh the defect due to the loss involved in the use of a heliostat. Therefore, in the furnace to be constructed, the heliostat type structure was adopted.

In designing the optical system, the aperture of the paraboloidal mirror was fixed at 10 m. The solar energy of this area amounts to about 70 kW, which is not much but sufficient to make the furnace serviceable for the study of the semi-industrial uses of solar energy if necessary.

The optimum value of the focal ratio is a difficult problem. Theoretical calculations show that it differs with the shape of the target used. When the target is flat, a circular portion, 1/100 of the focal length in diameter, achieves the highest temperature. The energy absorbed per unit area per unit time can be computed by assuming that absorption follows Lambert's Law. In figure 1, these values are plotted against the focal ratio. It will be seen that the energy absorbed hardly increases when the

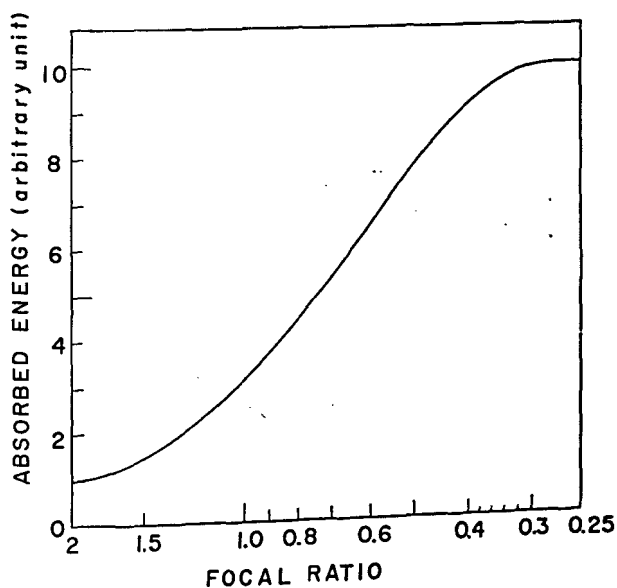


Figure 1. Energy absorbed by a flat target per unit area per unit time as a function of focal ratio

\* Tohoku University, Sendai, Japan.

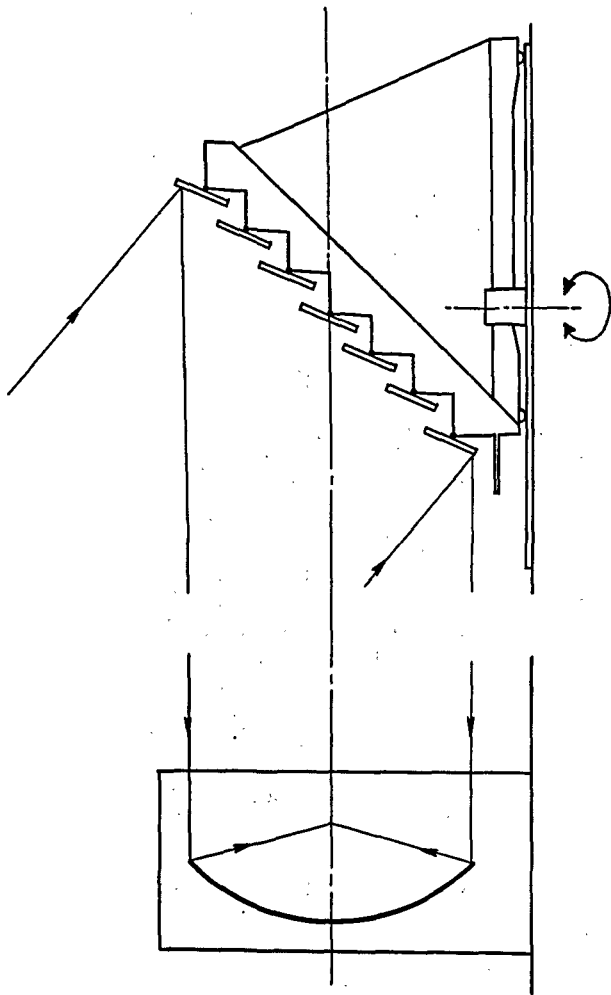


Figure 2. Optical system of the furnace

focal ratio is decreased below 0.4. When the target is cylindrical, the optimum focal ratio becomes less than 0.25, and for a spherical target, the smaller the focal ratio the better it is, provided that the volume of the target at the highest temperature is not taken into account. In actual practice, flat targets will most frequently be employed. Hence, in this case the focal ratio is taken as 0.32. It gives a focal length of 3.2 m and an image by an axial ray, 3.2 cm in diameter.

When the optical surface of a paraboloidal mirror or a plane mirror in a heliostat is not perfect, image formation is reduced and the portion of the target at the highest temperature decreases in diameter. In the present construction, the decrease is limited to 20 per cent of the diameter, requiring an accuracy in image formation  $1/500$  of the focal length. For this, tolerance of the reflecting surfaces is taken at  $1/2000$  radian. This means that the reflecting surfaces of individual mirror pieces and their mountings must be as accurate as the above value throughout the whole operation. The most important difficulty in the mounting is the distortion of the heliostat frame which occurs when elevation of the

frame changes. To eliminate this difficulty, a plane mirror is divided into seven horizontal bands which are mounted one above another in step formation on the frame, as illustrated in figure 2. These bands are elevated synchronously about parallel axes, while the frame as a whole is rotated about a vertical axis. Each band is 2 m wide and 15.5 m long. The seven bands together compose an aperture large enough to cover the aperture of the paraboloidal mirror between 8 a.m. and 4 p.m. all the year round, taking the apparent radius of the sun into consideration. The distance between the centre of the heliostat and the focus of the paraboloidal mirror is 36 m. This is the value necessary to permit the heliostat to receive the radiation at the winter solstice and beyond the roof of a building which will inclose the paraboloidal mirror in the near future.

### Construction of mirrors

As material for the mirrors, various metals and plastics were suggested, but finally glass was adopted as having the most excellent reflecting surface. There are two kinds of mirror glass: one is that in which the back surface is silvered or aluminized, and the other is that in which the front surface is aluminized. The former is stable and easy to handle but loss of radiation occurs through absorption within the glass. Using various kinds of window glass 10 mm thick, the reflectivity of both types of mirror was measured. At an incident angle of  $15-40^\circ$ , the front surface mirror was found to reflect 95-92 per cent of solar radiation, while the back surface mirror was found to give only 67-57 per cent. As the absorption thus measured was not small,

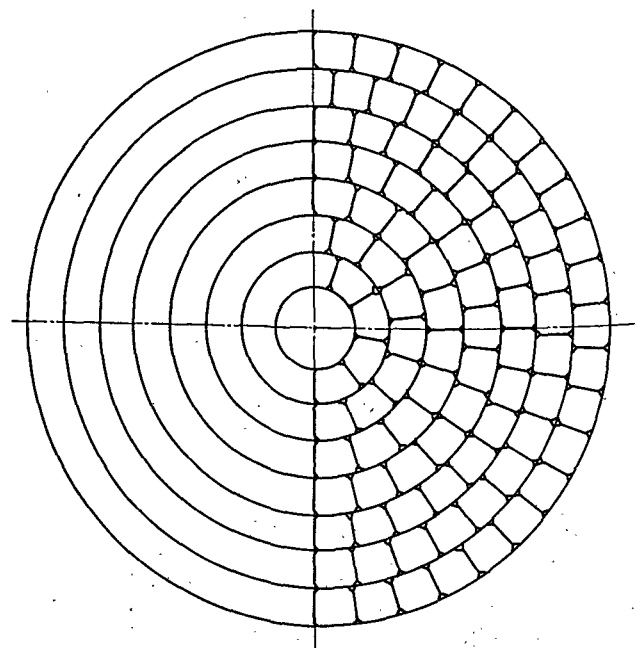


Figure 3. Paraboloidal mirror pieces



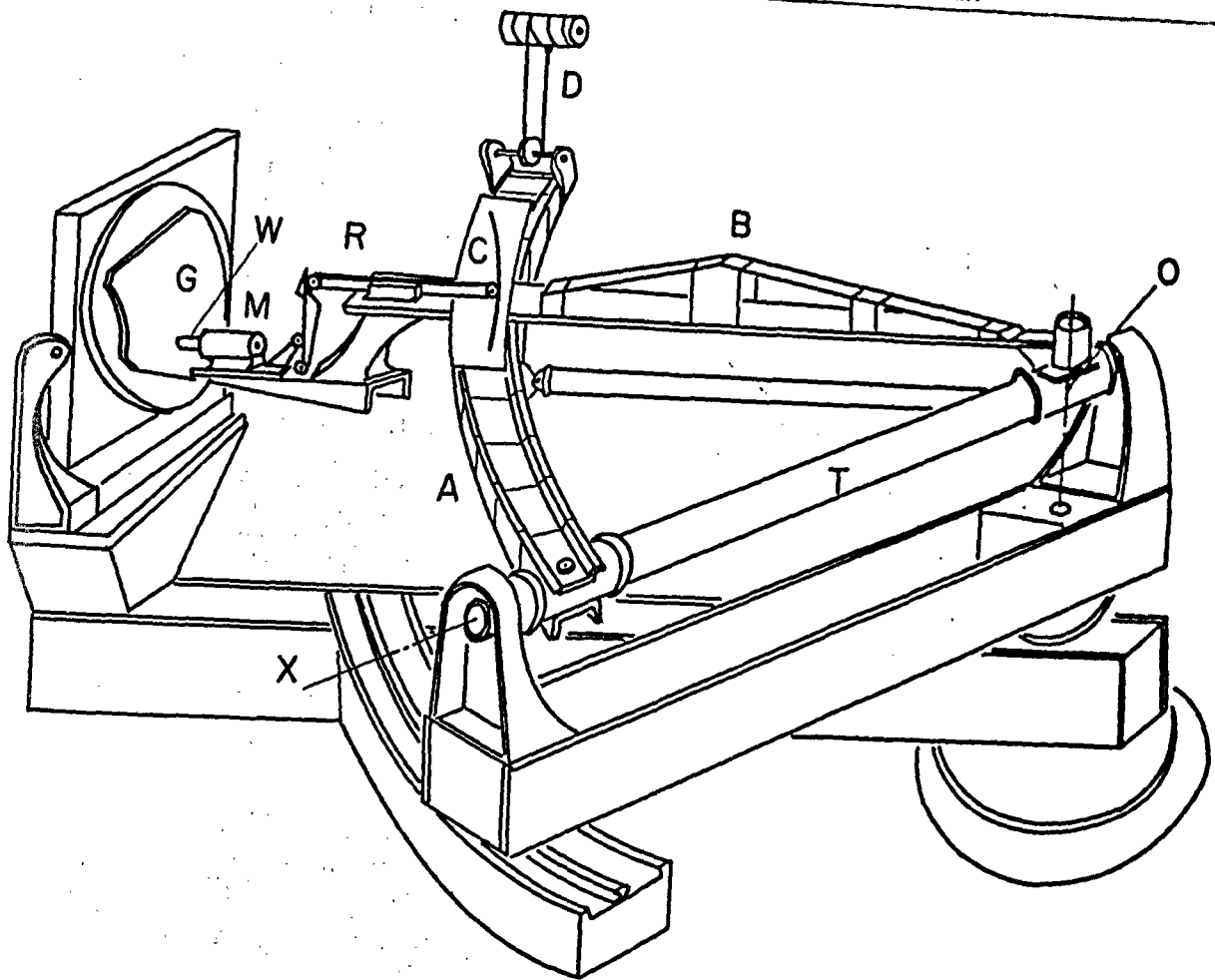


Figure 4. Paraboloidal surface grinder

the front surface system was adopted for both the plane and paraboloidal mirrors.

In the fabrication of mirrors, the paraboloid was divided into 181 pieces, as illustrated in figure 3. A circular portion, 90 cm in diameter at the centre, was left out for convenience of observation. Window glasses were cut into these forms, curved by placing them on a mould and heating them to yielding temperature in an electric furnace and then annealing them. Moulds were made by fixing refractory powder on an iron plate by means of a binder, shaping the surface into a paraboloid by means of a gauge plate and then drying. Six molds could be piled in the furnace at one time, and the average time needed for a single course was about 3.5 days.

To shape the blanks, a paraboloidal surface grinder was constructed, as illustrated diagrammatically in figure 4. In this figure, *T* is a cylinder the axis of which forms an optical axis *X*, and it can be rotated about the axis. The arc *A* is fixed to the cylinder and its centre is the point *O* at the end of the cylinder. The beam *B* can be rotated about the axis at a point *O* along the arc. A glass blank *G*

is fixed on an adjustable table. A diamond wheel *W*, driven by a high speed motor *M*, grinds the blank. The distance between the wheel and the centre is about 7.4 m.

On the arc, a cam *C* is mounted. When the beam moves on the arc, the rod *R* in the beam is displaced by the cam. This shift is reduced in magnitude and transmitted to the motor which drives the diamond wheel. In this way, the wheel follows a parabolic track. On the other hand, by raising or lowering the end of the arc with a winch *D*, the diamond wheel can be made to rotate about the optical axis; thus it is possible to make the wheel cover a paraboloidal surface. Using this apparatus, a single blank could be shaped within 3 hours.

The blank thus shaped was smoothed with an iron tool using emery as an abrasive and then polished by a flexible pitch surface using cerium oxide. The finished surfaces were aluminized by vacuum evaporation. By these procedures, all the mirrors were fabricated with the tolerance required.

The plane mirror pieces of the heliostat are 100 × 90 × 1 cm in dimension. In each mirror

### Paraboloidal mirror support

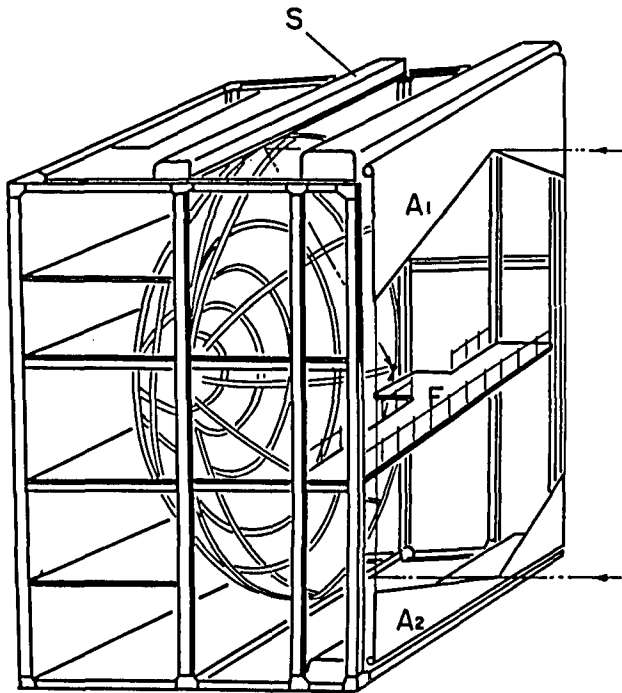


Figure 5. Paraboloidal mirror support

The construction of the paraboloidal mirror support is illustrated in figure 5. The steel skeleton is 11 m wide, 7 m deep and 13 m high. Inside the skeleton, parabolic beams on which the coaxial steel circles are fixed are set in radial directions. Each individual mirror piece is fixed on a frame and is mounted on the steel circles by three joints which enable it to be adjusted.

When the mirror is not in use, it is protected from dust by a screen which is rolled up into *S* when the furnace is in operation. In front of the mirror, there is a floor *F* to facilitate experimental work. Radiation is focused at a point 70 cm above the floor.  $A_1$  and  $A_2$  are V-shape diaphragms which can approach each other towards the optical axis. This attenuator is driven by a variable speed motor and controls the temperature of the target.

The outside of the skeleton construction is covered by a galvanized iron plate with the exception of the front. In the near future, however, the skeleton will be enclosed in a steel concrete building provided with large doors to cover the front opening. The floor will then be connected to the second floor of the building and the whole operation will be done in the adjoining room.

band, 34 pieces are mounted, giving a total number in all seven bands of 238. These pieces were selected by tests from commercial window glasses of the highest grade to determine whether or not they possessed the requisite accuracy. Their surfaces were likewise aluminized by vacuum evaporation.

### Heliostat

The steel skeleton of the heliostat has the form of a tumbled pyramid, as illustrated in figure 6. The rectangular plane of the pyramid, on which the seven mirror bands are mounted, makes an angle

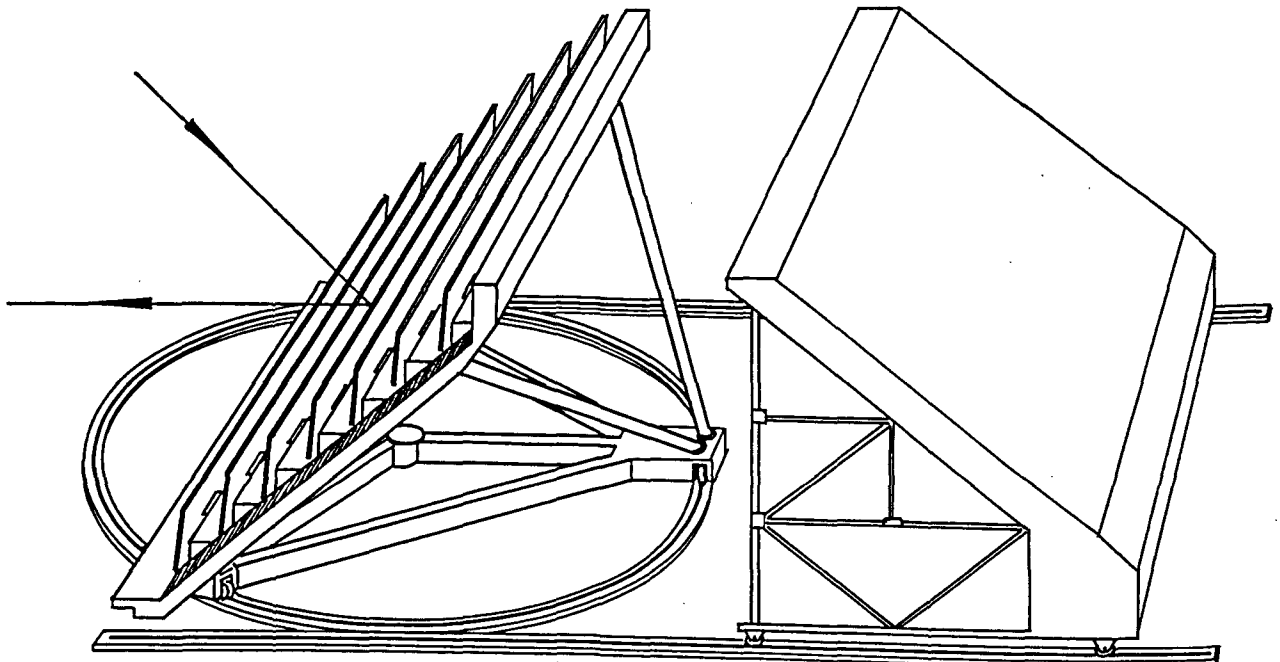


Figure 6. Heliostat and cover

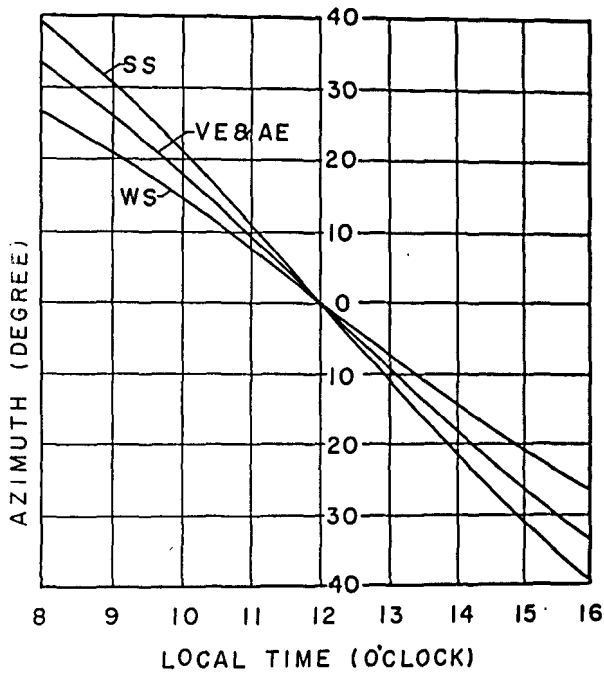


Figure 7. Required azimuth of heliostat mirrors as a function of local time, at summer solstice (SS), winter solstice (WS), vernal equinox (VE), and autumnal equinox (AE)

of 45° to the perpendicular. The heliostat can be rotated about the axis placed at the centre of the horizontal triangular beam. At the apexes of the triangular beam, rollers are settled, which can move along a circular rail. One of the rollers is used as a driver. Such a tripod support prevents any distortion in the skeleton structure even when the rail surface is not perfectly even.

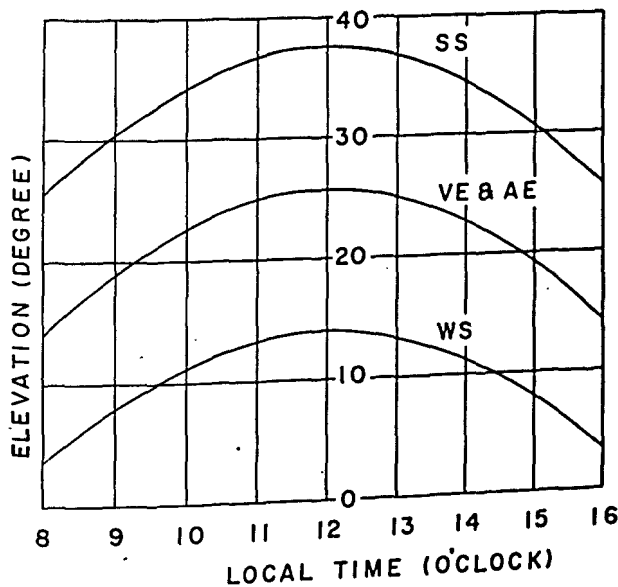


Figure 8. Required elevation of heliostat mirrors as a function of local time, at summer solstice (SS), winter solstice (WS), vernal equinox (VE), and autumnal equinox (AE)

The plane mirror pieces are held in frames, and these frames are mounted on the mirror band beams by means of three joints which enable adjustments to be made in the direction of the mirror pieces.

Taking the latitude and the longitude of this institute as 38°17' N. and 140°51' E. respectively, the azimuth of the heliostat necessary to convey radiation into a paraboloidal mirror at various local times was calculated. In figure 7, the values for equinoxes and solstices are plotted. As can be seen, the curves in this figure are nearly straight, although their inclination changes slightly according to the season. This means that the driving of a roller at a constant speed can maintain the azimuth at very nearly required value all day long. Any small deviation introduced can easily be corrected by controlling the driving speed by means of an image following servo-system.

The necessary values of the angle of elevation against the local time were plotted, as given in figure 8. As can be seen from this figure, the value of the elevation differs considerably according to the season, but variations in relation to local time are nearly the same.

The seven mirror bands are inclined synchronously by a connecting rod joined to their levers, as illustrated in figure 9. Therefore it is possible to obtain the required elevation by giving the rod suitable piston motion and transference. After various trials, the crank system illustrated in the same figure was devised. If the mechanical constants of the system are properly chosen, a constant speed driving the crank shaft gives the mirrors the required elevation with sufficient accuracy, as shown in figure 10.

The crank system is mounted on a movable table. By the transference of the table, it is possible to

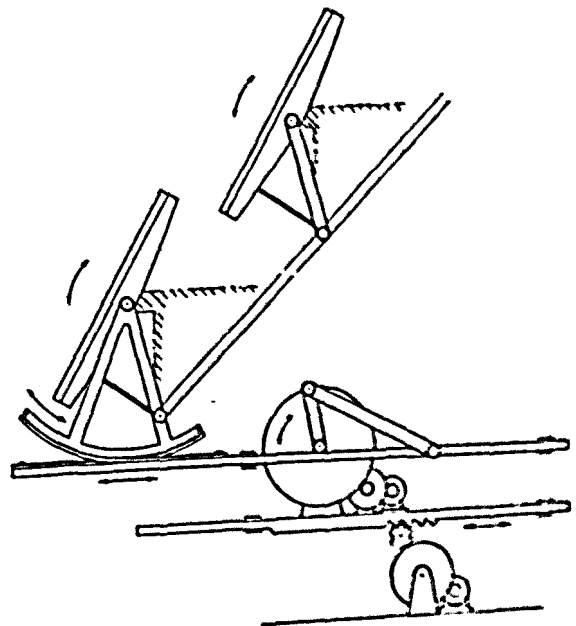


Figure 9. Elevation driving system

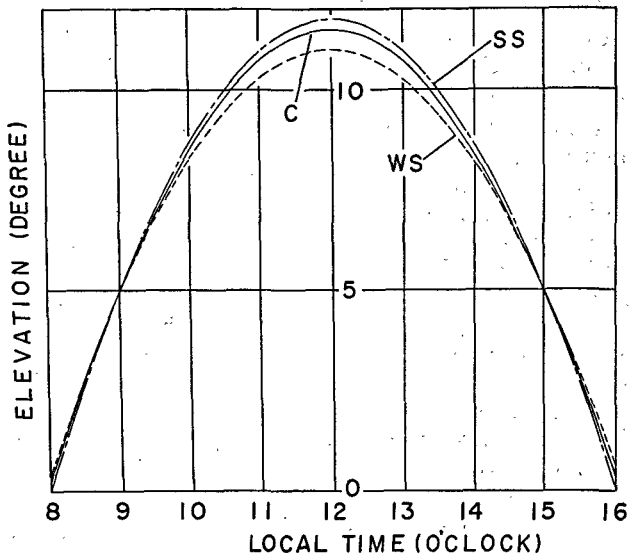


Figure 10. Elevation change obtained by crank system (c) and that required at summer solstice (SS) and winter solstice (WS). The curve on equinoxes coincides with C

adjust the mirrors to the seasonal change of elevation. Moreover, the transference driving is controlled by the image following servo-system which corrects small errors in elevation arising out of the crank system.

The azimuth driving system and the elevation driving system of two kinds, namely, crank motion and transference, are provided with three motors with a speed of 200:14:1 (maximum). The motors with the higher speeds are used to make the heliostat ready for operation while those with a medium speed are used for fine adjustments. The lower speed motors are those with variable speed and are used for the actual driving.

When the heliostat is not in use, it is kept facing north and protected with a cover as shown in figure 6. The cover moves along rails and is driven by a motor. Its contacts with the heliostat are suitably cushioned; in this way the mirrors are cut off from the open air so as to maintain good reflecting surfaces.

### Servo-system

The principle of the image following servo-system used to control the azimuth and elevation driving systems is illustrated diagrammatically in figure 11. Radiation from the heliostat is reflected by a small prism  $P$  in front of the attenuator  $A$  and enters a lens  $L$ , 6.5 m in focal length. The lens makes an image of the sun on a screen  $S$  placed in a controlling panel. The optical system is adjusted so as to maintain the image at the centre of the screen when the radiation from the heliostat is parallel to the optical axis of the paraboloidal mirror. Two pairs of small phototransistors are mounted on the margin of the image in exact focus, right and left, and above and below.

If the image of the sun is displaced to the right or the left, one of the pair of phototransistors is illuminated and its photovoltage amplified, thus changing the voltage of the azimuth driving motor so as to retard the displacement. Similarly, when either of the pair above and below is illuminated, its photovoltage produces transference in a positive or negative direction of the rod in the elevation driving system. By this means, the image in the furnace is kept at a steady position with great accuracy.

When the sun is covered by cloud, the servo-system ceases to operate, but the astronomical clock driving system, mentioned in the preceding paragraph, continues to function. This prevents any difficulties which might occur when the sun reappears.

### Conclusion

In the above, the details of a large solar furnace under construction have been described. The expenditure on construction is not yet definitive but will be approximately as follows.

	\$
Plane and paraboloidal mirrors . . . . .	23 000
Paraboloidal mirror support . . . . .	21 000
Heliostat with cover . . . . .	41 000
Power supply and servo-system . . . . .	7 000
Foundation work . . . . .	7 000
<b>TOTAL</b>	<b>102 000</b>

It will be remarked that the above accounts do not include the cost of the personnel which included ourselves and eight workers in the optical workshop of our institute.

Sendai is called "the Forest City" because of its

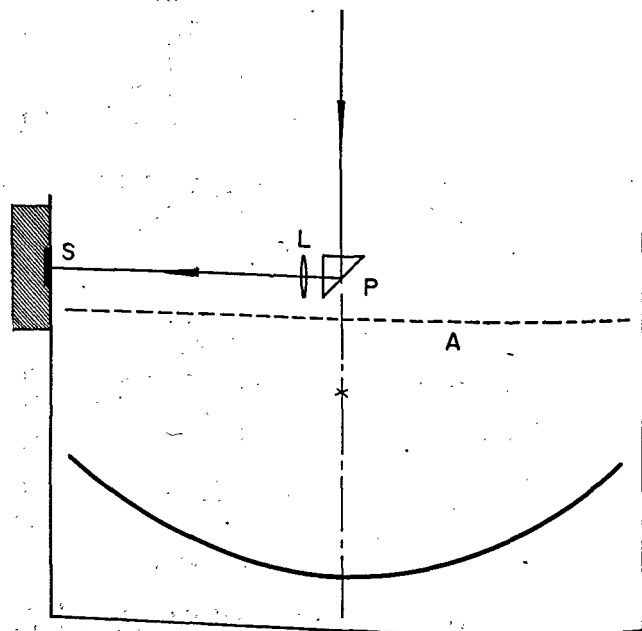


Figure 11

few industries. Therefore, the air is always kept free from smoke and dust, which reduce solar radiation. Our furnace is under construction on a hill on the site of our institute, commanding a view of the city to the south.

At present (March 1961), the foundation work is finished and the skeleton structure of the paraboloidal mirror support and the heliostat is being erected. It will be completed towards the beginning of June, 1961, to be followed by various operational

tests. Therefore, at the Conference, further details about the construction will be presented.

In conclusion, the writers wish to express their deep appreciation to Professor T. Hibi, director of this institute, for his continual encouragement in this work, and to all the members of the optical workshop for their assistance in the mirror construction. This work was supported by the Science Research Expenditure Department of the Ministry of Education.

### Summary

For the purpose of basic and applied researches in high temperature physics and chemistry, a large solar furnace of high efficiency was constructed. It consists of a paraboloidal mirror placed in such a way that its optical axis is horizontal, and a heliostat to convey radiation from the sun to the paraboloidal mirror.

The paraboloidal mirror, 10 m in aperture and 3.2 m in focal length, is a mosaic composed of 181 mirror pieces. To make the blanks of the mirror pieces, window glasses 10 mm thick were cut and curved by placing them on a mold and heating them to yielding temperature in an electric furnace. In order to shape the blanks accurately into portions of a paraboloidal surface, a paraboloidal surface grinder was constructed. The blanks thus shaped were smoothed and polished. The finished surface was aluminized by vacuum evaporation to form a front surface mirror.

The paraboloidal mirror support has a steel skeleton structure on which two coaxial steel circles are fixed. The mirror pieces are mounted on these circles. Two V-shape diaphragms, above and below, which can be brought together towards the optical axis, form an attenuator to control the temperature of the target. The support is covered by a galvanized iron plate with the exception of the front. In the near future, however, it will be enclosed in a concrete building provided with large doors to cover the front opening.

The heliostat has a steel skeleton structure, and is in the form of a tumbled pyramid. The rectangular plane of the pyramid makes an angle of  $45^\circ$  to the perpendicular. On this plane, seven band frames of a mirror 2 m wide and 15.5 m long are mounted one above another in step formation. In each frame, 34 mirror pieces ( $100 \times 90$  cm) are placed. The blanks for the mirror pieces are selected from

commercial window glasses of the highest grade and their front surface is aluminized by vacuum evaporation. The seven mirror bands change their elevation synchronously by a connecting rod which is joined to the levers of their frames.

At the three apexes of a horizontal triangle beam, rollers are settled, which move on a circular rail about the axis at the centre of the triangle. One of the rollers is used as a driver. The azimuth of the heliostat is altered by means of a motor at a constant speed which differs according to the season. Any small error in the azimuth introduced is corrected by an image following servo-system.

The required elevation of the mirrors differs considerably according to the season, but variations in relation to local time are nearly the same. In order to provide the necessary movement of the connecting rod, a crank system has been devised. By moving the crank shaft at a constant speed, the elevation can be changed according to the time practically as required. The crank system can be transferred by means of another driving system. This system not only provides for the seasonal change of elevation but also corrects any error of the crank system through an image following servo-system.

A lens 6.5 m in focal length makes an image of the sun, on the margin of which two pairs of phototransistors are mounted, to right and left, and above and below. Any deviation of the image causes one of these phototransistors to be illuminated, and its photovoltage operates the servo-system, which retards the deviated image to the required position.

When the heliostat is not in use, it is kept facing north and protected by a cover.

The furnace will be completed at the beginning of June, 1961, and will then undergo various operational tests.

## CONSTRUCTION D'UN FOUR SOLAIRE DE GRANDES DIMENSIONS

*Résumé*

On a mis au point un four solaire de grandes dimensions et à gros rendement aux fins de recherches fondamentales et appliquées sur la physique et la chimie des hautes températures. Il est constitué par un miroir en forme de paraboloïde, placé de telle sorte que son axe optique soit horizontal, et un héliostat qui renvoie le rayonnement solaire à ce miroir.

Le miroir parabolique, dont l'ouverture est de 10 m et la distance focale de 3,2 m, est constitué à son tour par une mosaïque faite de 181 éléments réfléchissants. Les éléments bruts, avant usinage, ont été réalisés en coupant des morceaux de verre à vitre de 10 mm d'épaisseur, qui furent placés sur le moule et chauffés au four électrique jusqu'à leur température de ramollissement et convenablement courbés. Pour donner à chaque élément brut la forme exacte qu'il faut pour l'incorporer dans une surface parabolique, on a réalisé une meule à rectifier spéciale, épousant cette forme. Les éléments bruts ainsi façonnés furent régularisés et polis. La surface terminée reçut une couche d'aluminium par évaporation en enceinte évacuée, de manière à former une face antérieure réfléchissante.

Le support du miroir parabolique est constitué par une armature en acier qui porte une série de cercles, également en acier, disposés co-axialement. Les segments du miroir sont montés sur ces cercles. Deux diaphragmes en forme de V, l'un dans la moitié supérieure, l'autre dans la moitié inférieure du système, peuvent être rapprochés vers l'axe optique et constituent un atténuateur qui permet de régler la température établie à la cible. Le support est couvert par une plaque en fer galvanisé, sauf en sa partie avant. On se propose toutefois, dans le proche avenir, de l'entourer d'une structure en ciment armé qui sera dotée de grandes portes capables de recouvrir l'ouverture antérieure.

L'héliostat est pourvu, lui aussi, d'un châssis en acier, et présente la forme d'une pyramide inclinée. Le plan rectangulaire de cette pyramide forme un angle de 45° sur la verticale. Sept châssis porte-miroir, ayant 2 m de large et 15 m de long, sont montés en échelons sur ce plan, l'un au-dessus de l'autre. Chaque châssis contient 34 segments de miroir (100 × 90 cm). La matière utilisée dans la

réalisation de ces segments est choisie parmi des verres à vitres commerciaux de la plus haute qualité, et leur surface avant est traitée à l'aluminium par évaporation en enceinte évacuée. Les sept aires réfléchissantes changent d'inclinaison en synchronisme, étant commandées par une bielle rattachée à des leviers que portent les châssis.

Les galets de roulement du système reposent aux trois sommets d'une poutre de section triangulaire et se déplacent sur un rail circulaire autour du centre de ce triangle. Un des galets est l'élément moteur. L'azimut de l'héliostat varie sous l'impulsion d'un moteur à vitesse constante qui change d'une saison à l'autre. Un servo-dispositif suit constamment l'image et corrige toute légère erreur d'azimut éventuelle.

L'inclinaison des miroirs sur la verticale change beaucoup d'une saison à l'autre, et les variations qu'introduit l'heure locale sont presque les mêmes. On a conçu un système de manivelles de renvoi convenable pour imprimer à la bielle le genre de mouvement approprié. L'axe de manivelle ou vilebrequin tournant à vitesse constante, on peut faire changer l'inclinaison du système sur la verticale en fonction de l'heure à peu près comme il convient. Le système de manivelles peut être entraîné au besoin par un autre dispositif moteur. Celui-ci ne donne pas seulement les modifications saisonnières de l'inclinaison sur la verticale; il corrige également les erreurs dont est entaché le fonctionnement du système de manivelles au moyen d'un servo-dispositif qui suit constamment l'image.

Une lentille ayant une distance focale de 6,5 m donne une image du soleil, sur les bords de laquelle quatre paires de phototransistors sont installées, deux à droite et à gauche, deux en haut et en bas. Si l'image se déplace par rapport à sa position idéale, le phototransistor est éclairé et le signal qu'il émet fait fonctionner le servo-dispositif, lequel ramène l'image à sa position idéale.

Quand l'héliostat est au repos, il est orienté vers le nord et protégé par un panneau.

Le four sera prêt à fonctionner au début de juin 1961. Il sera alors soumis à divers essais en marche.

## CONDITIONS DE TRAITEMENT ET MESURES PHYSIQUES DANS LES FOURS SOLAIRES

*H. Trombe, M. Foëx et Ch. Henry La Blanchetais \**

Le choix du mode de traitement des substances au foyer d'un appareil concentrant l'énergie provenant d'une source à haute température (soleil ou source artificielle de rayonnement) va dépendre, d'une part, des caractéristiques de la substance traitée, en particulier de celles qu'elle présente vis-à-vis du rayonnement convergent et, d'autre part, des conditions mêmes dans lesquelles ce rayonnement est disponible (position des rayons porteurs d'énergie dans l'espace).

Il a été montré, dans diverses publications (1 à 6) que la concentration du rayonnement solaire pouvait être obtenue par une seule réflexion en utilisant un miroir parabolique dont l'axe est dirigé vers le soleil; néanmoins, cette disposition est relativement peu commode pour les divers traitements que l'on peut effectuer au four solaire. Les auteurs ont adopté, dans la plus grande partie de leurs expériences, des montages comportant l'emploi d'un miroir orienteur plan, mobile, éclairant un miroir parabolique fixe qui donne, par conséquent, une concentration d'énergie solaire dans une zone fixe de l'espace. Les montages correspondent au schéma de la figure 1 (7, 8) ou, particulièrement pour les installations de grandes dimensions, à celui de la figure 2 (9 à 14).

Les conditions d'éclairage des substances au foyer dépendent de l'orientation des surfaces qu'elles présentent par rapport à la direction de l'axe focal du système optique. Dans de très nombreux cas, les surfaces réceptrices ou les plans des orifices par où pénètre le rayonnement convergent dans des cavités appropriées sont perpendiculaires à l'axe focal. Néanmoins, on peut parfois avoir intérêt à recevoir l'énergie sur des surfaces inclinées par rapport à l'axe focal, ou même sur des surfaces parallèles à cet axe (cas du chauffage d'un cylindre dans l'axe d'un miroir parabolique). On conçoit que, dans les conditions précédentes, le maximum de concentration d'énergie, sur une surface déterminée, puisse être obtenu par le développement particulier de certaines parties d'un miroir parabolique. Par exemple, le chauffage d'une surface inclinée par rapport à l'axe focal pourra être amélioré par le développement asymétrique de la surface parabolique (figure 3). Dans le cas du chauffage d'un cylindre d'axe confondu avec l'axe focal, une augmentation de l'ouverture du miroir ( $> 4 f$ ) sera efficace pour

augmenter les apports énergétiques. Par contre la suppression de la zone centrale (figure 4) au centre pondra qu'à une faible perte d'énergie.

Les caractères de la substance à traiter qui interviennent dans la réception de l'énergie sont à la fois d'ordre thermique et d'ordre optique. En effet pour chacune des longueurs d'onde d'un rayonnement (ultraviolet, infrarouge, proche ou lointain), chaque substance aura un facteur de réflexion, un facteur d'absorption et un facteur de transmission. Le total de ces trois facteurs étant égal à l'unité. Le choix de ces conditions de réception du rayonnement sera donné par la nécessité de diminuer la transmission et la réflexion des substances, aux dépens de leur absorption. Il faudra également tenir compte de la variation notable de la valeur relative de ces facteurs en fonction de la température. La réception par une substance de l'énergie apportée par un rayonnement dépendra donc de la courbe d'émission énergétique de ce rayonnement en fonction de la longueur d'onde et, pour chacune des longueurs d'onde, de la fraction de cette énergie totale absorbée par la substance.

Les calories ainsi reçues serviront à produire une élévation de température dont la valeur sera conditionnée aussi par un certain nombre de facteurs thermiques. Naturellement, cette élévation de température pourra se trouver limitée ou même empêchée par la transformation des corps, en même temps la vaporisation, ou encore par des évaporations ou des réactions chimiques éventuelles, mais les deux facteurs thermiques principaux qui interviennent indépendamment de toute transformation sont la chaleur spécifique et surtout la conductibilité thermique à différentes températures. En définitive, les traitements par des rayonnements convergents seront surtout dominés par le facteur d'absorption des substances et leur conductibilité thermique. Étant donné que, la plupart du temps, le facteur d'absorption des substances est nul ou très faible et leur conductibilité thermique très grande, nous serons obligés d'avoir recours à certains dispositifs pour augmenter ces inconvénients.

Augmenter le facteur d'absorption pourra se faire de plusieurs manières. Le premier qui peut être employé dans bien des cas et que nous utiliserons le plus souvent consiste à faire perdre apparemment à la substance ses caractères optiques en la recouvrant d'un revêtement isotherme que l'on appelle improprement « corps noir »; nous verrons plus tard que le corps

\* Laboratoire de l'énergie solaire du Centre national de la recherche scientifique, Mont-Louis, Pyrénées-Orientales, France.

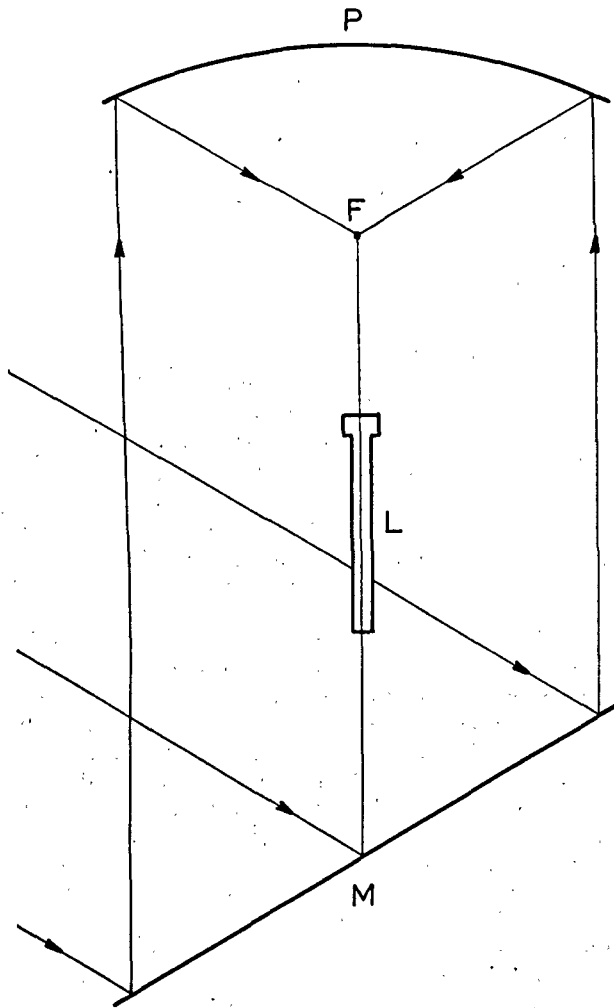


Figure 1

noir réalisé pour la réception d'un rayonnement convergent présente des avantages particuliers.

Une autre technique pour augmenter l'absorption sera de multiplier les réflexions dans la substance, afin d'augmenter dans celle-ci le trajet du rayonnement. Un tel résultat peut être obtenu commodément en augmentant l'état de division de la matière, par exemple par un broyage.

La diminution de la conductibilité thermique, second facteur prépondérant que nous avons cité, sera obtenu de même en augmentant l'état de division des substances.

### Traitement direct des substances

Le procédé le plus simple pour porter à haute température les substances à l'aide d'un rayonnement convergent consiste à placer la surface du produit à traiter au niveau du foyer du système optique. Si le système est d'axe vertical ou s'il permet des concentrations énergétiques suffisantes sur des plans peu inclinés par rapport à l'horizontale, on pourra

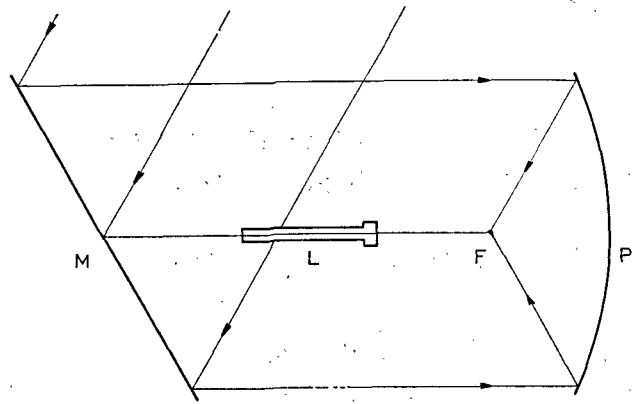


Figure 2

traiter de cette façon des matériaux en poudre ou des matériaux fragmentés reposant sur un support qui reste froid. Les traitements, fusions, transformations et volatilisations se font sans contamination, la substance traitée constituant son propre support (figure 5). L'inclinaison de la surface réceptrice peut parfois atteindre un angle de  $40^\circ$  par rapport au plan horizontal, ce qui correspond à l'angle que prend normalement un tas de matériaux fragmentés. Ce traitement direct peut donc s'effectuer sur une aire quelconque supportant la matière à traiter. Un aménagement mécanique du support peut permettre son déplacement dans un plan horizontal. La matière soumise à l'action du rayonnement convergent est ainsi constamment renouvelée et le rendement de l'opération à haute température se trouve accru, les volatilisations de substance étant notablement diminuées.

Cette méthode de traitement direct est beaucoup plus facile à utiliser avec les appareils d'une certaine dimension qu'avec les petits fours de laboratoire, en particulier lorsque les matériaux à traiter ne sont pas réduits en poudre fine. En effet, la profondeur de la zone focale étant sensiblement de l'ordre du diamètre du foyer, la concentration énergétique change rapidement lorsqu'on se déplace parallèlement à l'axe du système convergent. Dans les petits fours, un affaissement de 1 cm de la surface traitée pourra

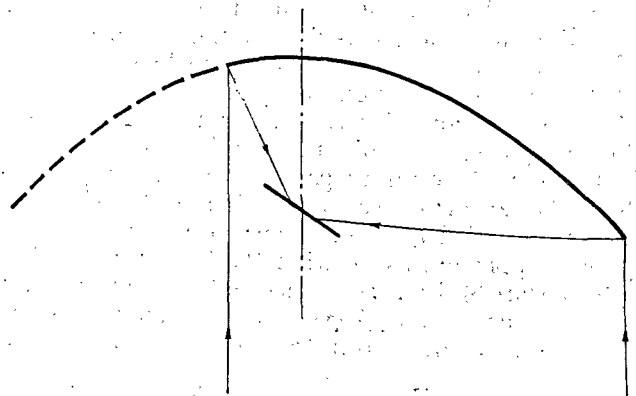


Figure 3



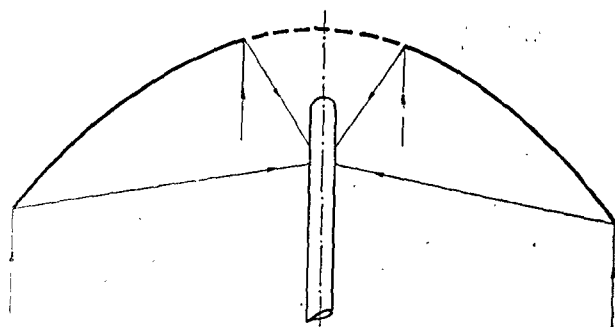


Figure 4

correspondre à une notable diminution de la concentration énergétique. Dans les grands fours, au contraire, on pourra accepter des variations de niveau de la surface traitée beaucoup plus importantes.

On peut également, à l'aide d'une installation à axe horizontal (figure 6), traiter une substance préalablement frittée, le produit fondu s'éliminant constamment de la surface traitée par gravité. Si la surface soumise au rayonnement reste solide, on peut, sur cette surface, obtenir des réactions diverses de fixations ou de dissociations ou, comme on le verra dans le mémoire S 52, éliminer des impuretés contenues dans le corps solide.

Le traitement d'une baguette verticale peut se faire soit par un système convergent à axe vertical mais, autant que possible, de très grande ouverture (figure 7 A), soit par un système à axe horizontal agissant latéralement (figure 7 B). Particulièrement dans le second cas, il est très important de faire tourner la baguette réfractaire sur elle-même pour éviter des surchauffes locales. Dans le cas de la figure 7 A, le chauffage d'une baguette réfractaire sera réalisé avec des concentrations énergétiques maxima lorsque la baguette aura un diamètre de l'ordre de l'image du soleil dans le système optique utilisé et que l'ouverture du miroir pourra être supérieure à 4 f.

Une autre méthode de traitement direct, très efficace pour la confection de pièces importantes en matière fondue, consiste à réaliser sur la surface fondue un apport continu de matière (figure 8). On maintient la zone en fusion au niveau du foyer

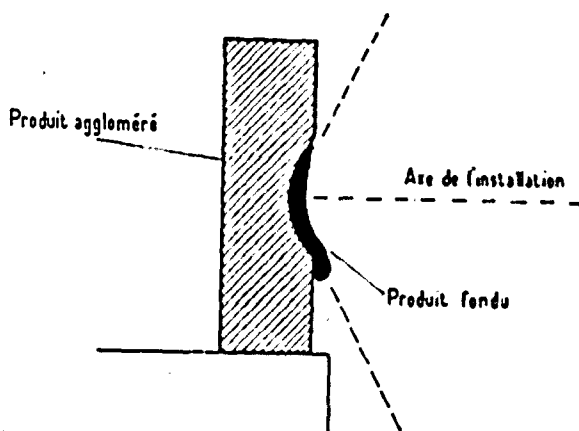
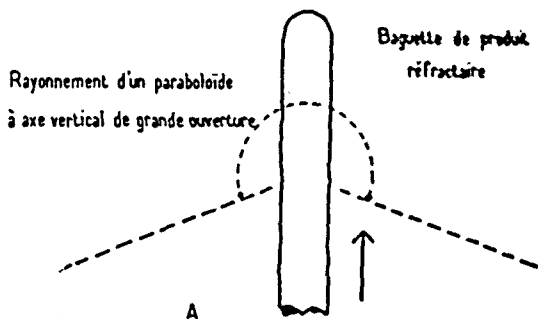


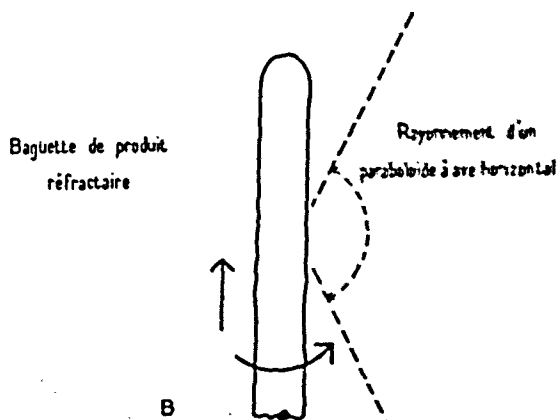
Figure 6

en abaissant progressivement le support de la tige réfractaire. Une rotation superposée à faible vitesse permet d'avoir des baguettes plus homogènes que lorsque le support n'a qu'un mouvement vertical.

Lors des traitements de substances soumises directement à l'action d'un rayonnement de haut éclairement énergétique, la température monte très vite et atteint, après un temps de l'ordre d'une seconde, une valeur suffisante pour assurer la fusion



Fusion d'une baguette de produit réfractaire disposée verticalement avec un four solaire d'axe vertical à très grande ouverture



Fusion d'une baguette de produit réfractaire disposée verticalement avec un four solaire d'axe horizontal

Figure 7

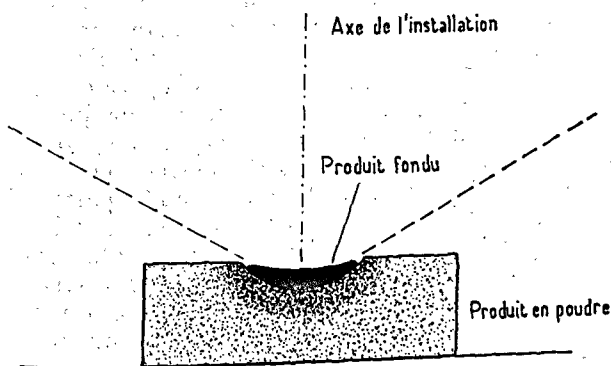


Figure 5

de la substance. Le calcul permet d'évaluer la température superficielle prise pour la zircone. D'après G. Ribaud (15), la température  $\theta$  d'une surface opaque et absorbante d'épaisseur suffisante soumise à l'action d'un rayonnement présentant un certain éclairage énergétique  $\phi$  évolue en fonction du temps  $t$  suivant la formule :

$$\theta = \frac{2\phi}{\sqrt{\pi\lambda c\rho}} \sqrt{t}$$

où  $\lambda$  est la conductibilité thermique,  $c$  la chaleur spécifique et  $\rho$  la densité. Nous avons fait ce calcul pour la zircone en adoptant  $\phi = 300$  cal/cm<sup>2</sup>/sec, un facteur d'émission moyen de l'ordre de 0,4,  $\rho = 6,2$ ;  $\lambda = 0,004$  cal/cm<sup>2</sup>/°C/sec;  $c = 0,16$  entre 0 et 1 000 °C;  $\lambda = 0,0042$  cal/cm<sup>2</sup>/°C sec;  $c = 0,18$  entre 0 et 1 500 °C;  $\lambda = 0,0045$ ;  $c = 0,19$  entre 0 et 2 000 °C;  $\lambda = 0,0050$ ;  $c = 0,21$  entre 0 et 2 700 °C<sup>1</sup>. Le temps calculé est de l'ordre de 3 secondes, ce qui est très voisin des résultats moyens trouvés expérimentalement. Ce temps serait de l'ordre d'une demi-seconde, si le facteur d'émission était de un. On arrive à des résultats de ce genre avec des zircons impures colorées. On aurait ainsi :

1 000 °C en 0,19 sec pour un facteur d'émission de 0,4 et  
0,03 sec pour un facteur d'émission de 1;

1 500 °C en 0,51 sec pour un facteur d'émission de 0,4 et  
0,08 sec pour un facteur d'émission de 1;

2 000 °C en 1,12 sec pour un facteur d'émission de 0,4 et  
0,18 sec pour un facteur d'émission de 1;

2 500 °C en 2,25 sec pour un facteur d'émission de 0,4 et  
0,32 sec pour un facteur d'émission de 1;

2 700 °C en 3,1 sec pour un facteur d'émission de 0,4 et  
0,49 sec pour un facteur d'émission de 1.

On a tenu compte, pour l'obtention des valeurs précédentes, du rayonnement de la zircone portée à haute température et supposée un corps gris, ce qui ne change pas beaucoup les résultats.

La montée en température des métaux, plus conducteurs, souvent réflecteurs du rayonnement, est un peu plus lente, mais encore assez rapide. On a calculé, dans le cas du fer : 1) non oxydé brillant, présentant un facteur d'absorption de 0,3 environ pour le rayonnement solaire; 2) recouvert d'une couche d'oxyde de fer avec un facteur d'absorption de l'ordre de 0,7 pour le rayonnement solaire. En adoptant  $\rho = 7,8$  cal/cm<sup>2</sup>/°C/sec,  $c = 0,2$  (chaleur spécifique moyenne entre 20° et 1 530 °C en tenant

<sup>1</sup> Dans ce calcul, le facteur d'émission est considéré comme égal au facteur d'absorption global du rayonnement solaire.

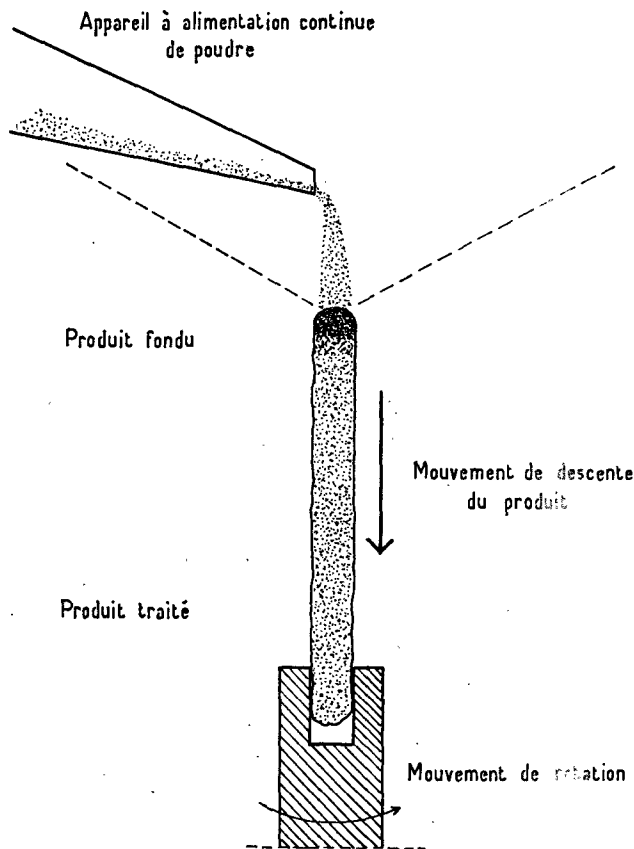


Figure 8

compte des chaleurs de transformation). Le facteur d'absorption du soleil est d'environ 0,3 pour le fer non oxydé et 0,7 pour le fer oxydé. Les temps trouvés sont de l'ordre de 36 secondes dans le premier cas et de 6 à 7 secondes dans le second.

### Traitements en cavité

Le principe du traitement en cavité consiste à disposer la matière à traiter dans une cavité fixe ou tournante. Cette cavité présente un orifice d'accès du rayonnement solaire, de dimensions aussi réduites que possible. Le plan dans lequel se trouve situé l'orifice doit pratiquement coïncider avec le plan focal ou, plus généralement, avec le plan sur lequel peut être obtenu le maximum de densité d'énergie. Le diamètre de l'orifice d'accès doit évidemment être minimum, pour atténuer autant que possible les pertes par rayonnement et par convection de la cavité chauffée. Néanmoins, comme il est nécessaire de capter dans le four la plus grande partie de l'énergie localisée dans la zone focale, on adopte, en général, un diamètre d'orifice un peu plus grand que celui de l'image théorique donnée par le système optique considéré. La surface intérieure du four doit, de toutes manières, être beaucoup plus grande que la surface de l'orifice par où pénètre le rayonnement.

L'homogénéité de température des cavités ou fours dépend, pour une large part, de la nature de leurs parois. La plupart des oxydes réfractaires ont un facteur d'émission élevé dans l'infrarouge au-dessus de 2 ou 4 microns; au contraire, dans le visible et l'infrarouge, les valeurs sont très variables. L'emploi d'oxydes réfractaires comme l'oxyde de chrome et surtout la chromite donne des résultats très différents, ces produits absorbant fortement le rayonnement solaire (80 p. 100 par exemple), d'où hétérogénéité considérable des températures. Des parois « blanches » en brique d'alumine ou de magnésie réfléchissent d'une façon diffuse la plus grande partie du rayonnement solaire (80 p. 100), ce qui permettra de réaliser une excellente répartition de l'énergie à l'intérieur du four et, partant, une température relativement uniforme. Par ailleurs, ces oxydes présentent tous deux un fort facteur d'émission propre dans l'infrarouge, favorable aux échanges par rayonnement, ce qui complète l'effet précédent. L'usage de tels oxydes présente néanmoins un inconvénient; une partie du rayonnement solaire réfléchi à l'intérieur du four est perdue à travers son orifice; cette fraction est d'autant plus importante que le facteur de réflexion est élevé et que le rapport entre les surfaces internes et la surface d'ouverture de la cavité est faible. Des substances présentant une très forte réflexion pour le rayonnement incident, pouvant atteindre 95 p. 100 ou même 98 p. 100 (magnésie par exemple), permettent d'obtenir une excellente homogénéisation de la température par réflexions successives, mais elles ne sont utilisables que si la surface interne du four est très grande par rapport à la section de l'ouverture par où le rayonnement incident est partiellement réfléchi. Ainsi, par exemple, un petit four de 2 kW, présentant une ouverture de 16 mm de diamètre (environ  $2 \text{ cm}^2$ ) et une capacité cubique de l'ordre de 10 cm de côté ( $600 \text{ cm}^3$ ) fonctionnera dans de bonnes conditions. Il n'en serait pas de même d'une capacité de 3 cm de côté ( $54 \text{ cm}^3$ ), le rapport surface interne/ouverture étant seulement de 27 au lieu de 300. Lorsque l'on se trouve dans l'obligation de réaliser de petites capacités, il est préférable d'utiliser des réfractaires ayant un facteur de réflexion un peu plus faible (80-90 p. 100) pour le rayonnement solaire, tout en évitant d'employer des produits trop absorbants, qui donneraient de fortes hétérogénéités de température.

Pratiquement, la zone à insolation maximum correspond à une zone entièrement éclairée par la périphérie du miroir (figure 9). Le fond de la cavité est insolé à un moindre degré, d'où l'intérêt d'utiliser des surfaces réfléchissant bien le rayonnement solaire.

Au fur et à mesure que la température du four s'élève, le rayonnement émis par le four présente une plus faible longueur d'onde moyenne. Le rayonnement propre de la paroi devient de plus en plus considérable, mais la proportion d'énergie rayonnée dans des longueurs d'onde supérieures à 2 microns reste très importante jusque vers  $2000^\circ\text{C}$ . Enfin,

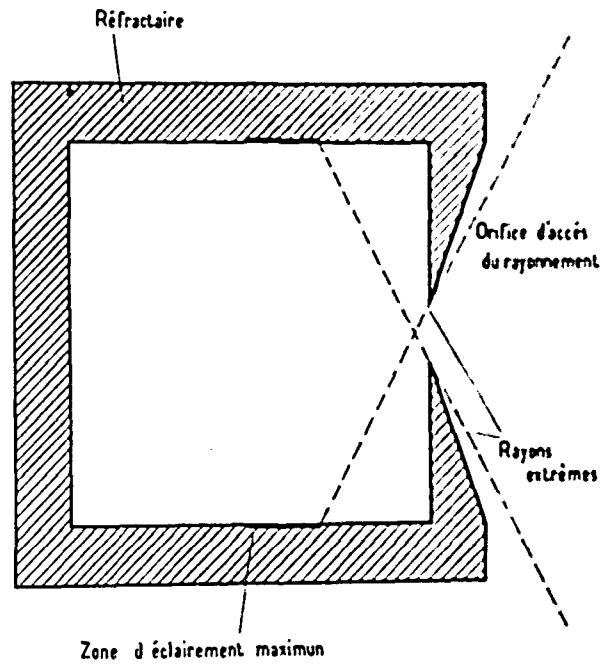


Figure 9

on a également utilisé des fours à parois hétérogènes, comportant des réfractaires fortement diffusants du rayonnement solaire dans les zones les plus insolées et des réfractaires absorbant ce rayonnement dans d'autres régions.

La forme du four a également une grande importance, la paroi opposée à l'orifice étant ou non fortement éclairée suivant la profondeur du four. D'autre part, on peut aussi utiliser les échanges par convection en plaçant l'ouverture vers le bas du four, mais ces échanges sont faibles par rapport aux échanges par rayonnement lorsqu'on opère vers  $2000^\circ\text{C}$ .

Dans bien des cas, le facteur d'émission de ces corps augmente avec la température. Ces pertes s'ajoutent aux pertes par rayonnement propre du four, qui ne dépendent pratiquement que de la température, pour une ouverture de section déterminée, et peu de la nature des parois, par suite des réflexions successives. Il convient, en outre, de bien distinguer entre les hétérogénéités de température en régime transitoire, qui se produisent en période d'échauffement, et les hétérogénéités de température intéressant le four en équilibre de température. Ce phénomène est beaucoup plus important dans le premier cas que dans le second.

#### Fours tournants dits « fours centrifuges »

L'utilisation du rayonnement avec les fours d'axe horizontal nécessite le plus souvent l'emploi de fours centrifuges, dans lesquels la substance est maintenue en place par rotation, l'accélération centrifuge étant suffisante pour compenser les forces de gravité. Cette rotation permet, d'autre part, de créer une

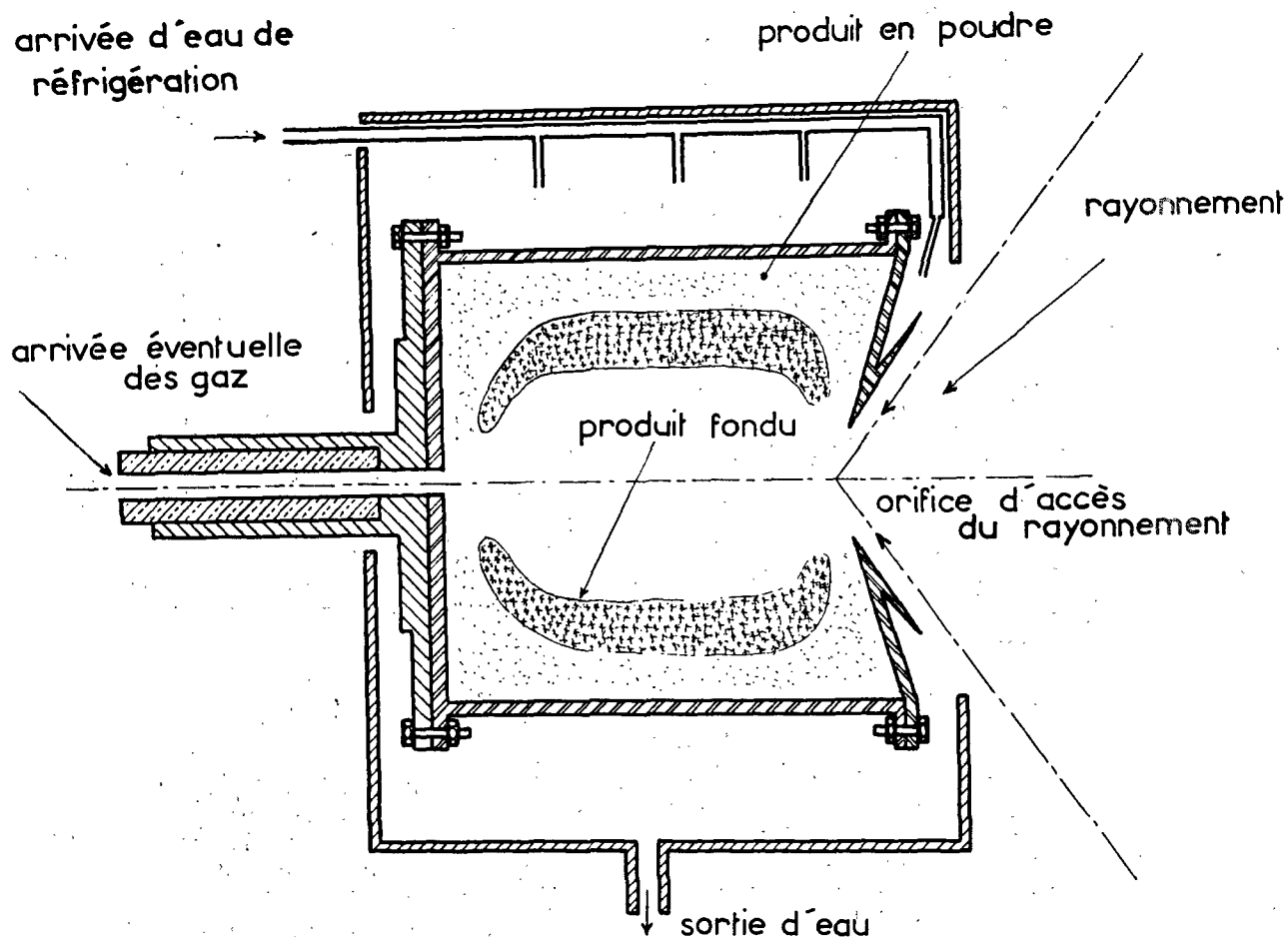


Figure 10

cavité au sein même du produit traité. Ces fours sont essentiellement constitués par une cuve métallique cylindrique tournant autour de son axe et entraînée, soit par un arbre en bout, soit par des galets périphériques. La face circulaire avant, démontable, est percée en son centre d'un orifice placé au foyer de l'installation et présentant un diamètre suffisant pour permettre au rayonnement de pénétrer dans la cuve. Sous l'effet de la force centrifuge, le produit en poudre ou concassé placé dans la capacité est plaqué sur les parois. Il se forme ainsi une cavité dans laquelle s'accumule l'énergie admise par l'orifice d'accès du rayonnement. La capacité métallique est refroidie extérieurement par un courant d'eau, de manière à éviter une trop grande élévation de sa température susceptible de la détériorer ou de la fondre. Il se crée ainsi un gradient de température considérable entre la capacité intérieure et les parois réfrigérées de la cuve. La cavité s'agrandit généralement plus ou moins au cours du traitement, au fur et à mesure que la fusion ou le frittage progresse en profondeur, et l'on obtient une masse à température élevée, isolée thermiquement des parois métalliques par l'excès de produit en poudre jouant le rôle de calorifuge (figure 10). Les fours centrifuges

permettent aussi de se passer de creuset support et de traiter en cavité, avec des rendements élevés, les substances les plus diverses, quel que soit leur facteur d'absorption pour le rayonnement solaire.

Afin d'assurer une bonne protection des parois par réfrigération, il est nécessaire de constituer celles-ci avec un métal bon conducteur de la chaleur (aluminium, cuivre, etc.). On note une très mauvaise tenue des aciers réfractaires, trop peu conducteurs de la chaleur, qui, malgré la réfrigération par l'eau, fondent au voisinage de l'orifice du four.

Les caractéristiques des fours centrifuges dépendent de l'usage que l'on désire en faire. L'énergie admise est maximum au centre de l'orifice d'accès du rayonnement; elle décroît ensuite progressivement au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'axe. Il convient de limiter l'ouverture aux zones pour lesquelles l'énergie admise est supérieure à l'énergie rayonnée par la substance portée à haute température. L'ouverture sera donc plus petite pour des opérations à très haute température qu'à température moyenne. Le profil de la face avant doit dégager, autant que possible, le produit traité. Une forme assez bonne est représentée par la figure 10. Elle permet au rayonne-

ment de rentrer dans le four, tout en augmentant l'épaisseur de la poudre calorifuge de la face avant. C'est, en effet, dans cette zone que le calorifuge a la plus faible épaisseur.

Les fusions au four centrifuge s'effectuent le plus souvent sans grande surchauffe du produit fondu, la température étant limitée par la fusion de la couche sous-jacente et les mouvements de convection dans la masse liquide étant importants. Le choix des produits d'attaque, lors de certains traitements de minerais, par exemple, est donc très important, et il sera souvent avantageux d'utiliser pour cela des composés à haut point de fusion, tels que la chaux, au lieu d'oxydes alcalins.

Si la température des fours centrifuges est à peu près constante au cours des opérations de fusion, il n'en est pas de même du volume intérieur, qui croît avec le temps, la densité du produit fondu étant supérieure à la densité apparente de la matière pulvérulente. Parallèlement, l'épaisseur de la poudre inaltérée située contre les parois et servant de calorifuge décroît et les pertes calorifiques par conductibilité thermique augmentent. L'énergie disponible pour la fusion diminue donc progressivement.

L'influence de la vitesse de rotation sur la cavitation est relativement faible, mais une vitesse élevée a pour effet d'augmenter le diamètre des cavités au détriment de leur profondeur.

L'énergie apportée sur la surface interne de la cavité, il existe dans la masse fondue un léger gradient de température dirigé du centre vers la périphérie. La densité diminuant en général avec la température, la force centrifuge n'interviendra guère pour brasser le produit, mais des variations périodiques de la vitesse ont une action favorable dans ce sens.

La densité apparente de la poudre introduite dans la cavité est très importante, car les poudres de faible densité apparente sont de meilleurs calorifuges que les autres; et la cavitation est d'autant plus rapide que la densité est plus faible. La cuve peut être pleine en début d'opération ou comporter déjà une cavité formée à froid par centrifugation, ce qui permet une meilleure captation du rayonnement dans la phase initiale de l'opération. Par contre, la quantité de matière fondue est plus grande lorsqu'on utilise une matière apparemment plus dense. Afin de pallier à cet inconvénient, on peut, soit recharger la cuve en cours d'opération, soit placer initialement, dans la partie centrale, un produit plus dense que vers la périphérie.

La fusion des produits traités débute relativement lentement, une grande partie de l'énergie solaire étant réfléchiée par le produit en poudre, surtout lorsqu'il s'agit de substances « blanches ». Cette vitesse croît ensuite et passe par un maximum; elle diminue ensuite progressivement à partir du moment où l'épaisseur de la poudre calorifuge commence à diminuer dans de trop larges proportions. Une interruption brusque du rayonnement solaire provoque souvent une solidification débutant au centre. L'inverse se produit lorsque la solidification

s'effectue progressivement sous l'action de l'augmentation des pertes calorifiques dues à la diminution de l'épaisseur du calorifuge.

Dans un premier stade de recherche, les fours centrifuges ont été destinés au traitement des produits relativement peu conducteurs de chaleur, tels que les oxydes et les composés oxygénés. De nombreux composés non oxygénés, comme les halogénures, les fluorures en particulier, ou les sulfures, peuvent être fondus, à condition d'opérer à l'abri de l'air. Le procédé est également applicable aux produits métalliques lorsque l'état de division de ceux-ci permet de réaliser un isolement thermique suffisant de la masse portée à haute température. Une autre méthode consiste à fondre les métaux dans un creuset (figure 11), constitué par une substance réfractaire peu conductrice de la chaleur et formée au préalable dans la cuve même du four centrifuge.

### Essais en atmosphère conditionnée

Les essais en atmosphère rigoureusement conditionnée nécessitent l'emploi de parois transparentes au rayonnement solaire (figure 12), c'est-à-dire laissant passer la plus grande partie du rayonnement de longueur d'onde comprise entre 0,3 et 3 microns. Les différents verres blancs ordinaires sont suffisamment transparents, mais leur résistance aux chocs thermiques ne peut convenir. Par contre, le pyrex ou le verre de silice donnent d'excellents résultats (figure 13). Sous des épaisseurs de 2 mm, le premier laisse passer environ 85 p. 100 du rayonnement solaire, et le second 80 p. 100 pour une variété moyennement pure. Le pyrex supporte des éclaircissements énergétiques de l'ordre de 20 watts/cm<sup>2</sup> et la silice vitreuse peut, sans se détériorer, être soumise à des éclaircissements énergétiques atteignant 500 watts/cm<sup>2</sup>, c'est-à-dire être placée très près de la zone focale; mais ces chiffres ne sont valables qu'en l'absence de vapeurs susceptibles de se déposer sur les parois transparentes et d'arrêter une partie du rayonnement solaire. Pratiquement, on ne devra pas dépasser, respectivement, 5 et 50 watts/cm<sup>2</sup>. Nous avons également utilisé des parois transparentes en matière plastique (plexiglass). Cette matière présente l'inconvénient de posséder des bandes d'absorption dans l'infrarouge; ce phénomène est peu gênant pour les feuilles minces de l'ordre de 1 à 2 mm, mais l'est beaucoup plus lorsqu'on utilise des parois épaisses. Le plexiglass absorbe environ 20 p. 100 du rayonnement solaire pour une épaisseur de 10 mm, et ne peut pratiquement recevoir plus de 2 watts/cm<sup>2</sup> ni supporter d'actions mécaniques ou de pressions notables. Par contre, de très bons résultats sont obtenus avec des feuilles minces (0,05 à 0,2 mm) de matières plastiques, à condition de ne les faire traverser que par de faibles énergies par unité de surface. Les feuilles minces laissent passer 92 p. 100 du rayonnement solaire, mais en diffusent, en général, une petite partie, leur surface étant médiocrement lisse. La réfrigération des surfaces permet, dans une certaine mesure, de limiter

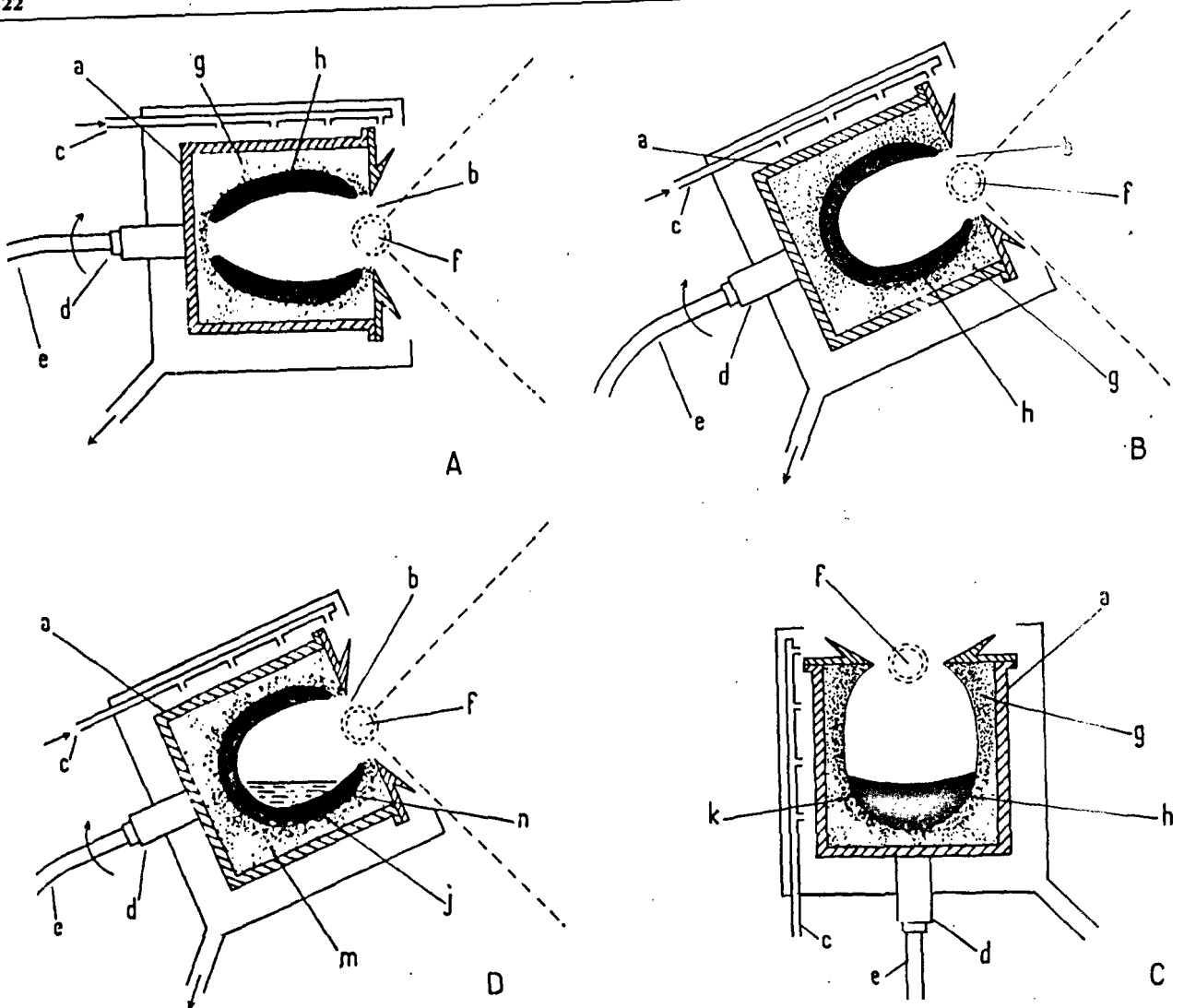


Figure 11

- A. Four centrifuge en rotation rapide (axe horizontal)  
 B. Four centrifuge en rotation rapide (axe incliné)  
 C. Four centrifuge arrêté (axe vertical)  
 D. Four centrifuge en rotation lente (axe incliné)

- a) Cuve métallique  
 b) Orifice d'accès du rayonnement  
 c) Réfrigération par jet d'eau  
 d) Axe de rotation  
 e) Flexible  
 f) Axe de basculement

- g) Produit en poudre  
 h) Produit en fusion  
 j) Creuset de produit réfractaire préalablement fondu  
 k) Produit fritté  
 m) Poudre calorifique de même nature que le creuset  
 n) Produit traité dans le creuset

leur échauffement. L'eau donne de bons résultats. Afin d'éviter une absorption trop importante du rayonnement solaire dans l'infrarouge, on peut faire ruisseler l'eau sur les surfaces transparentes, mais cela entraîne une certaine dispersion du rayonnement solaire convergent. La méthode de la double paroi avec circulation d'eau nécessite une certaine épaisseur d'eau et limite l'énergie admise. Les courants d'air rapides sont très efficaces dans le cas où l'on a à réfrigérer de larges surfaces de plastique faiblement éclairées par unité de surface. Dans l'infrarouge (au-dessus de 4 à 5 microns), le pyrex et le verre

de silice absorbent le rayonnement à l'exception d'une bande de réflexion vers 9 microns. Les plastiques présentent des bandes d'absorption, mais sont partiellement transparents sous faible épaisseur. Le rayonnement de plus grande longueur d'onde émis par la substance portée à haute température contribuera donc beaucoup à l'échauffement des parois. Cependant, cet échauffement des parois par le rayonnement émis par la substance est, en général, très limité. Lorsque la température atteinte dépasse 1 500 ou 2 000 °C, la proportion d'infrarouge, au-dessus de 3 à 4 microns, est relativement faible

par rapport à l'énergie totale rayonnée. Considérons une substance traitée au foyer d'un miroir parabolique de 2 mètres de diamètre et de 85 cm de distance focale; cette substance sera irradiée sur 2 cm<sup>2</sup> environ avec une énergie moyenne de 1 kW cm<sup>2</sup> (angle solide de réception : 3,3 stéradians). Si cette substance a les propriétés d'un corps noir et ne perd de l'énergie que par rayonnement, elle émettra 1 kW/cm<sup>2</sup> sur 2 cm<sup>2</sup> et sera portée à environ 3 370 °C; elle émettra, dans un angle solide double de celui de la réception, une quantité d'infrarouge moyen minime. En réalité, la température atteinte est le plus souvent inférieure à celle mentionnée ci-dessus et ne dépasse guère 2 800 °C, dans les conditions définies plus haut, d'où une émission encore plus faible. A température plus basse, l'énergie globale émise est faible par unité de surface et la matière traitée ne rayonnera des quantités importantes d'énergie que si les surfaces chauffées sont beaucoup plus importantes que la surface du foyer, par exemple lorsque l'on défocalise. Lorsque la température atteinte de cette façon ne dépasse pas quelques centaines de degrés, pratiquement tout le rayonnement émis se situe dans l'infrarouge. Différents types de parois ont été essayés avec nos installations de 2 kW : ballons sphériques, coupoles hémisphériques, tubes, plaques. Citons un dispositif récemment mis au point au Laboratoire de l'énergie solaire de Mont-Louis, qui consiste à utiliser une feuille de plastique moulée sous forme d'un cylindre de grand diamètre, fixé

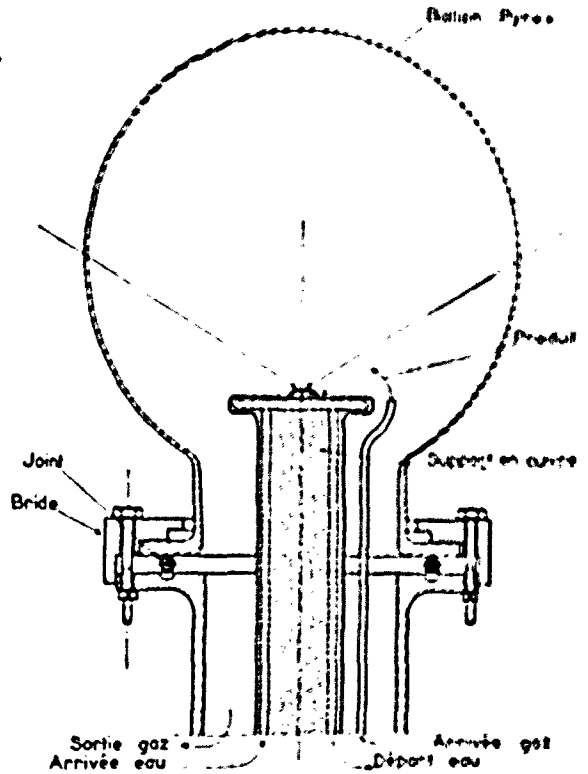


Figure 12

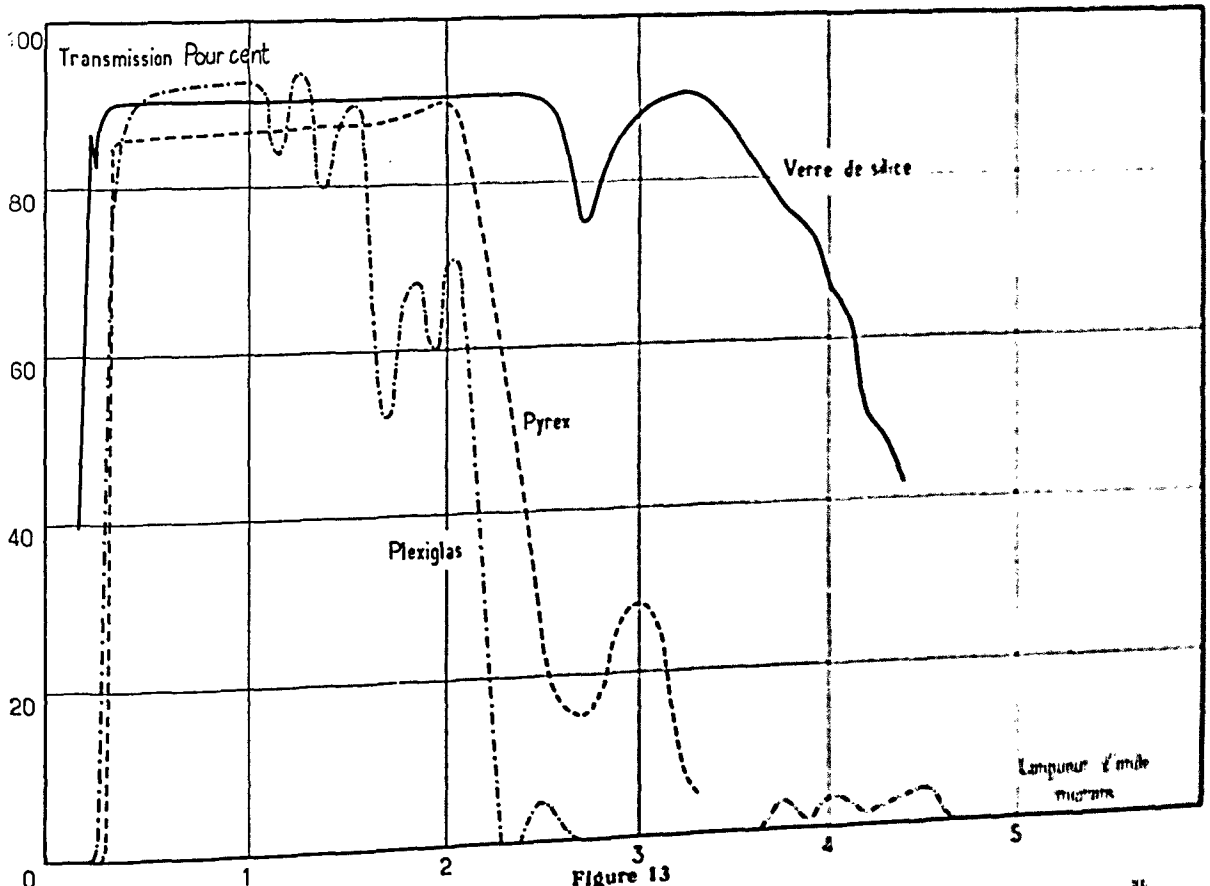


Figure 13

sur un tube, à ses extrémités, par des ligatures et formant un ballon, de diamètre compris entre 15 et 32 cm et de capacité de 20 à 75 litres. Le ballon est gonflé par le gaz choisi pour constituer l'atmosphère de traitement. Nous avons aussi utilisé des coupoles de plexiglass hémisphériques de 30 cm de diamètre pour des opérations en atmosphères variées, mais sous une pression égale à celle de l'atmosphère. Les parois de verre pyrex ou de verre de silice permettent de réaliser des opérations sous vide. Pour les hauts vides, la silice est certainement le meilleur produit, l'absorption des gaz et, surtout de l'humidité, pour ce verre réfractaire, étant très faible. Le plexiglass épais peut être employé sous vide pendant des temps très courts; il a l'inconvénient de dégazer considérablement. Une méthode très commode pour opérer en atmosphère conditionnée consiste à utiliser des ballons de verre pyrex comportant une bague avec rodage plat reposant sur un joint torique (figure 12). En ce qui concerne les essais sous pression, nous avons utilisé des pressions allant jusqu'à 20 kg cm<sup>2</sup> environ et des plaques de silice de 20 mm d'épaisseur (figure 14). Les parois transparentes en verre pyrex ou en silice sont souvent

obscurcies par les vapeurs ou fumées dégagées par les produits traités, portés à haute température. Les opérations sont ainsi freinées ou arrêtées plus ou moins rapidement, ce qui a pour effet de limiter le rendement. Cependant, dans certains cas, on note que les parties de ces parois qui sont éclairées s'obscurcissent beaucoup moins rapidement que celles qui ne le sont pas. Des ombres, même de très petites dimensions, formées au milieu de la zone éclairée, provoquent une accumulation privilégiée des vapeurs, ces dernières se répartissant, évidemment, surtout dans les régions obscures entourant la zone (calotte sphérique pour un ballon, disque pour le plan) traversée par le rayonnement. Le phénomène est plus net avec les vapeurs de produits colorés absorbant bien le rayonnement solaire. Il dépend de la nature de l'atmosphère et est maximum avec l'hydrogène, cependant que des pressions de l'ordre du centimètre ou de quelques millimètres permettent d'obtenir les effets les plus marqués. On n'observe plus rien sous haut vide. Enfin, le phénomène dépend de la valeur de l'éclairement énergétique supporté par la paroi. Il ne s'agit pas de phénomène lié au chauffage de la paroi transparente. On peut le montrer

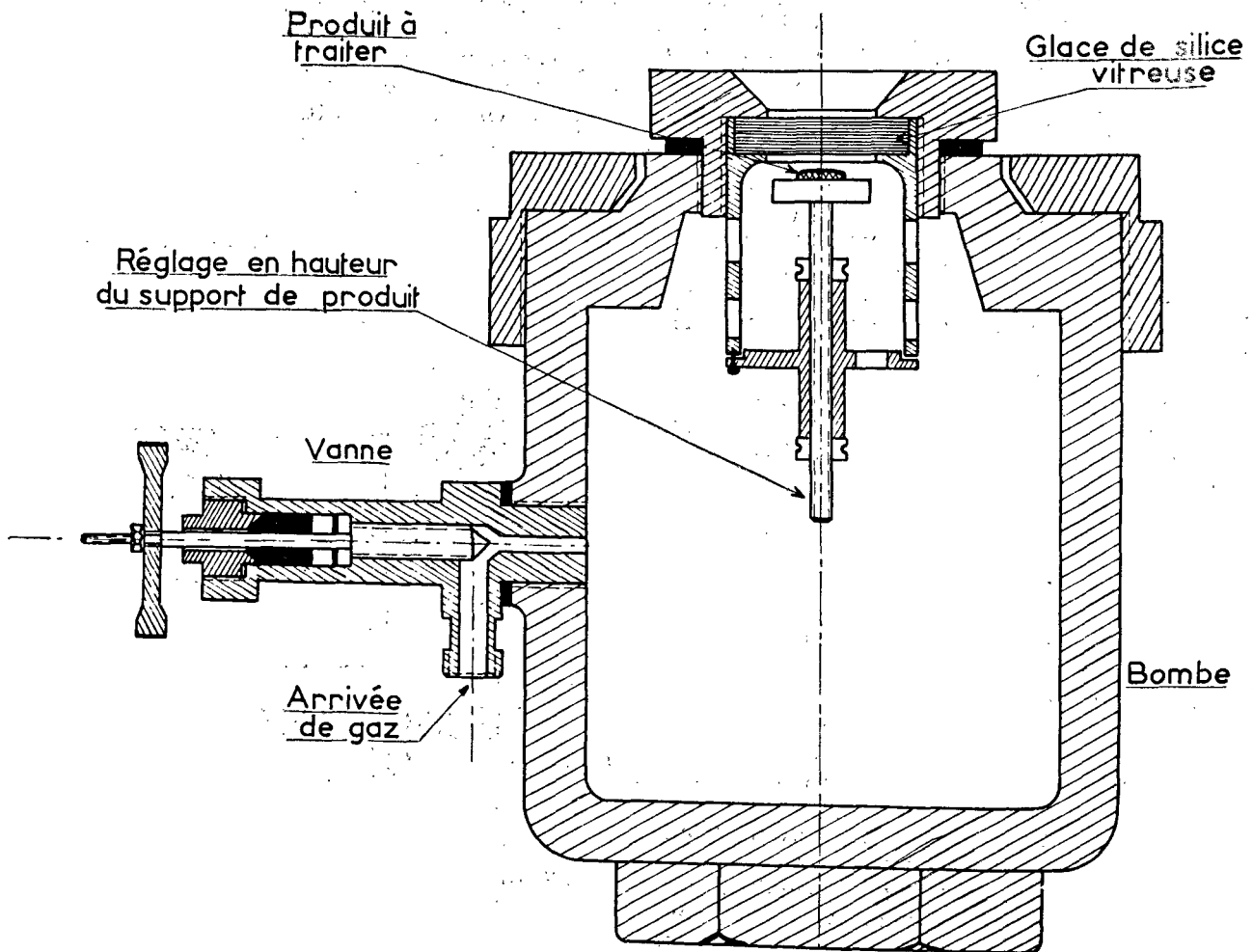


Figure 14



de diverses façons, en particulier, en déposant sur une portion de paroi externe une couche de produit absorbant le rayonnement solaire; dans ces conditions, le verre s'échauffe plus dans cette région que dans une autre, mais il se produit cependant un dépôt de vapeur notable dans cette région. Il doit donc bien s'agir de photophorèse positive, liée à l'échauffement privilégié de la face des particules exposées au rayonnement et au chauffage des gaz en contact de cette face. L'hydrogène plus conducteur thermiquement (0,00034 cgs) que les autres gaz (air : 0,000057) et moins visqueux (83 micropoises) qu'eux (air : 171 micropoises) donne les meilleurs résultats. Lorsque la pression est trop élevée, la convection gazeuse masque le phénomène. Dans un vide poussé, les molécules de gaz sont trop rares pour obtenir des effets notables. Bien que l'échauffement des parois transparentes ne provoque pas l'arrêt des dépôts de vapeur, il est possible que le dégazage de ces parois exerce une influence favorable à cet égard. Les particules précédentes pourraient être orientées aussi par magnétophorèse ou électrophorèse.

Enfin, des écrans tournant rapidement et disposés de façon à ne pas masquer le rayonnement permettraient de capter les vapeurs. Si le problème de la paroi transparente, pour le travail en atmosphère conditionnée, est facile à résoudre pour de petites installations, il n'en est plus de même dans le cas des fours de grande puissance. Les surfaces utilisées doivent être considérables, de l'ordre de 1 000 cm<sup>2</sup> pour la silice vitreuse dans le cas d'une installation de 50 kW. Il serait nécessaire de fragmenter cette paroi en plusieurs parties. Cependant, la silice peut supporter des éclaircissements énergétiques considérables à condition de ne pas recevoir de vapeurs condensables en cours d'opération. En l'absence de contamination, des parois de ce genre pourraient équiper des fours de 50 kW. Dans un domaine très différent, les plastiques transparents, se présentant sous forme de ballons de 1 m de diamètre (pour 50 kW), sont utilisables pour réaliser des atmosphères voisines de la pression atmosphérique.

### Mesures physiques

#### Mesure de l'énergie utilisable au foyer d'un four solaire

La mesure de l'énergie utilisable est faite commodément par un contrôle calorimétrique à l'aide d'un calorimètre « corps noir » représenté à la figure 15. Le calorimètre présente un orifice d'accès du rayonnement de diamètre tel que tout le rayonnement convergeant au foyer pénètre dans la cavité calorimétrique. Celle-ci, en cuivre et intériorisée, est maintenue au voisinage de la température ordinaire par un courant d'eau circulant constamment. La mesure de l'énergie captée par le corps noir est donnée par la quantité de calories évacuée par le courant d'eau de réfrigération. Le débit de ce courant étant connu, on mesure, à l'aide d'un thermo-

couple différentiel, le gain de température acquis par l'eau circulant autour du corps noir.

#### Mesures des températures

Voir plus haut le mémoire S/06 de M. Foëx (Mesures des températures au four solaire), qui est consacré à cette question.

#### Mesure de chaleurs spécifiques

Le procédé, d'ailleurs classique, consiste à chauffer, dans une cavité « corps noir » présentant des parois de nature convenable, la substance à étudier; cette substance est ensuite précipitée, par renversement de la cavité support, dans un calorimètre. La méthode s'applique particulièrement bien à l'étude des chaleurs spécifiques d'oxydes à l'état solide chauffés dans des creusets réfractaires corps noirs. Des mesures de chaleurs spécifiques ont été ainsi effectuées dans des domaines de température pouvant s'étendre jusqu'à 2 300 °C.

#### Études dilatométriques

Les mesures optiques de l'allongement des corps en fonction de la température (16) sont particulièrement applicables dans les fours solaires. La méthode consiste à viser les pointes d'un échantillon, de longueur connue à la température ordinaire, placé dans une cavité corps noir chauffée à l'aide du rayonnement solaire. Cette cavité étant soumise à des éclaircissements énergétiques de plus en plus élevés, on note, en fonction du temps, la température

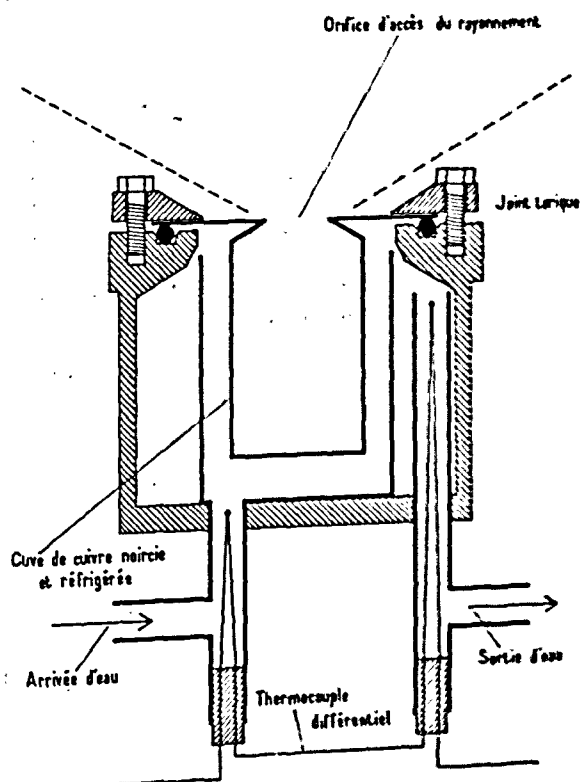


Figure 15

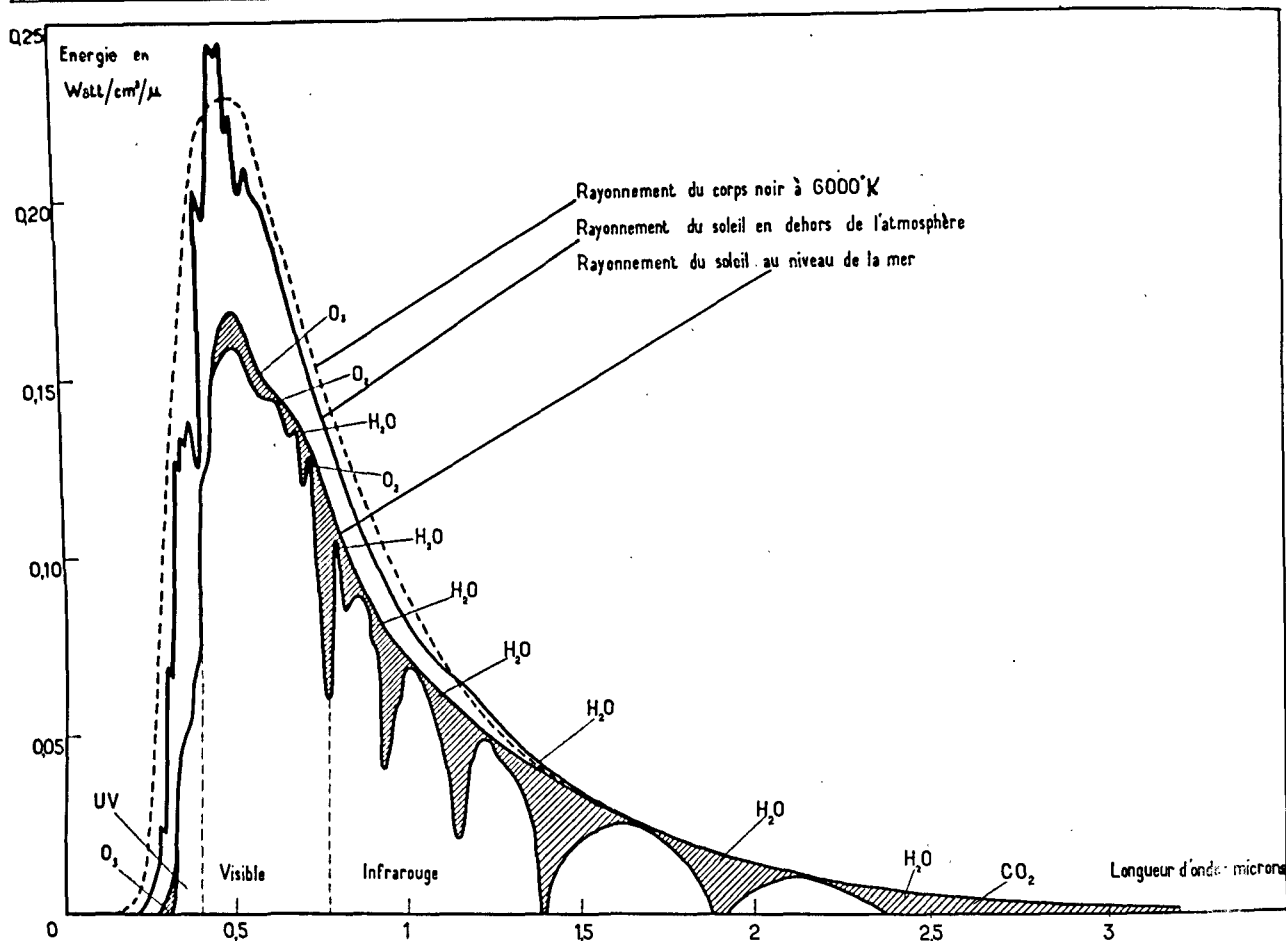


Figure 16

de l'échantillon et la distance entre ses pointes. Un comparateur, à deux cathétomètres ou à un seul, est utilisé.

### Traitements mixtes à hautes températures utilisant la combinaison de l'énergie solaire et d'une autre forme d'énergie

Ces traitements peuvent avoir pour but la réalisation de températures plus élevées ou l'obtention de meilleurs rendements. Considérons tout d'abord le cas où l'apport calorifique est réalisé par convection gazeuse, c'est-à-dire, essentiellement, le cas des flammes. De tels traitements ne seront efficaces que dans la mesure où les températures déjà réalisées avec le rayonnement solaire sont inférieures à celle de la flamme, sinon cette dernière exercera une action réfrigérante. Mais l'action de la flamme pourra être utile pour réaliser un préchauffage de la matière susceptible d'augmenter le facteur d'absorption pour le rayonnement solaire; par exemple, il est aisé d'amorcer ainsi la fusion du quartz, l'opération étant poursuivie au four solaire. La flamme pourrait servir également à diminuer les gradients de température et, par conséquent, à augmenter la température

maximum obtenue dans la zone la plus chaude, en agissant sur les zones périphériques. Les « plasmas » produits par les chalumeaux à plasmas auraient une action quelque peu analogue à celle des flammes, mais leur température très élevée (15 000 °C par exemple) n'est pas susceptible de perturber l'action du rayonnement solaire. Les possibilités de chauffage des substances réfractaires par les plasmas sont souvent quelque peu limitées par la vitesse des gaz (plusieurs fois la vitesse du son); des dispositifs mixtes utilisant le soleil permettraient sans doute de se placer dans des zones limites moins chaudes, mais où l'effet d'émission serait moindre. La combinaison du rayonnement solaire avec une autre énergie radiante permettra toujours de progresser en température. On peut ainsi songer à utiliser un four à image présentant des miroirs relativement petits afin de ne pas perturber le fonctionnement du four solaire. Dans le même ordre d'idée, un bombardement électronique est susceptible de s'utiliser dans un four solaire, dans le cas où l'on opère sous vide tout au moins. L'énergie d'appoint peut être amenée non seulement par convection ou rayonnement, mais aussi par conduction en utilisant l'effet Janle. L'emploi de résistances chauffantes métalliques ne peut être

envisagé que si ces résistances sont placées relativement loin de la zone focale portée à très haute température, ceci afin d'éviter leur détérioration. De meilleurs effets sont susceptibles d'être obtenus en faisant passer le courant dans la masse déjà chauffée par l'énergie solaire, et ainsi rendue conductrice lorsqu'il s'agit d'un produit isolant à la température ordinaire (cas de certains mélanges d'oxydes). D'une façon semblable, on pourra chauffer par induction haute fréquence des substances isolantes, préala-

blement chauffées par le rayonnement solaire. Cette dernière méthode pourrait être la meilleure combinaison possible de l'énergie solaire avec une autre forme d'énergie. Enfin, le chauffage d'appoint pourra intervenir dans une zone différente de celle où agit le rayonnement solaire. On peut ainsi concevoir un préchauffage par flamme des poudres fondues dans la zone focale, afin de réaliser des monocristaux par la méthode de Wetneuil avec un rendement très intéressant.

## Références

1. Trombe, F., Foëx, M. et Henry La Blanchetais, Ch., Concentration d'énergie solaire pour la réalisation de très hautes températures, *Annales de chimie*, 12<sup>e</sup> série, tome 2, 385-410, 1947.
2. Trombe, F., Foëx, M. et Henry La Blanchetais, Ch., Utilisation de l'énergie solaire, *Journal des recherches du CNRS*, n° 4-5, 1-25, 1948.
3. Guillemonat, A., *Un essai semi-industriel de captation de l'énergie solaire à Alger*, Congrès de Rio de Janeiro, 1954.  
Guillemit, J., L'Héliodyne de l'observatoire d'Alger, *Revue de l'aluminium français*, 1957.  
Juston-Comat, F. et Dubourg, M., *Le four solaire de Bouzaréah*, *Congrès français de l'azote*, 1957.
4. Conn, W.M., A solar furnace of 120 inches diameter for studying highly refractory substances, *Rev. of Scientific Instruments*, 22, 1945, 1951.  
Conn, W.M., Solar furnace for high-temperature research, *Bull. Am. Ceram. Soc.*, 30, (5), 163-164, 1951.
5. Trombe, F., Colloque national du Centre national de la recherche scientifique sur les utilisations de l'énergie solaire dans les domaines de la recherche et de l'industrie, Mont-Louis, 1958.
6. Hisida, Taro, Construction of solar furnace, *Transac. of the Conference on the Uses of Solar Energy*, vol. II, p. 228, novembre 1955, Tucson (Arizona).  
Hisida, Taro et collab., Concentration of the solar radiation in a solar furnace, *The Journal of Solar Energy, Science and Engineering*, vol. I, n° 4, 14-18, octobre 1957.
7. Straubel, H., Der Sonnen-Schmelzspiegel *Z. angew. Phys.*, 1, 542, 1949.
8. Conn, W.M., Über die Herstellung von Zirkonoxidglas mit Hilfe des straubelschen Sonnenspiegels, *Ber. Deut. Keram. Ges.*, 12, 118-122, 1931.  
Conn, W.M., *Trans. Electrochem. Soc.*, 64, 23, 65-71, 574-580, 1935.  
Conn, W.M., Putting the sun to work, U.S. Naval Office Research, *Res. Rev.*, 16-18 août 1940.
9. Trombe, F., Sur la réalisation d'un four solaire semi-industriel au laboratoire de Mont-Louis (Hyrénées-Orientales), *C. R. Ac. Sci.*, 235, 704, 1952.
10. Trombe, F., Sur quelques détails de montage du four semi-industriel de Mont-Louis, *C. R. Ac. Sci.*, 235, 1211, 1952.
11. Trombe, F., Le laboratoire de l'énergie solaire de Mont-Louis, *Bull. Soc. Chim.*, 3<sup>e</sup> série, tome 20, 252-260, 1952.
12. Davies, J.M. et Cotton, E.S., Design of the Quartermaster solar furnace, *The Journal of Solar Energy, Science and Engineering*, vol. 1, n° 2-3, 16-22, avril-juillet 1957.
13. Jose, P.D., The design of the heliostat mirror for a solar furnace, *ibid.*, 23-27.
14. Cohen, R.K. et Hiestler, N.K., A survey of solar furnace installations in the United States, *ibid.*, 113-116.
15. Ribaud, G., *C.R. Acad. Sci.*, 226, 204, 1948.
16. Chalmin, R., Colloque national du CNRS sur la chimie des hautes températures, Paris, 1954.

## Résumé

Le choix du mode de traitement d'une substance au foyer d'un appareil concentrant de l'énergie provenant d'une source à haute température dépend des caractéristiques de la substance traitée et des conditions dans lesquelles elle reçoit le rayonnement.

Pour la concentration de l'énergie solaire, les systèmes utilisés comportent le plus souvent un dispositif plan orienteur éclairant un miroir parabolique fixe; l'axe de ce dernier peut, suivant les utilisations envisagées, être vertical, horizontal ou incliné. Il peut être utile aussi d'employer des miroirs présentant un développement dissymétrique de leur surface réfléchissante pour conserver une densité d'énergie élevée sur la surface réceptrice, si celle-ci est inclinée

par rapport à l'axe focal. De même, lorsqu'il s'agit de chauffer un cylindre, on peut avoir intérêt, pour obtenir la concentration d'énergie maximum, à développer le diamètre apparent  $D$  de la surface parabolique au-delà de la valeur  $4f$  ( $f$  = distance focale).

Les caractères de la substance à traiter, qui interviennent, sont à la fois d'ordre thermique et d'ordre optique.

a) La substance doit présenter un facteur d'absorption maximum pour le rayonnement utilisé et des facteurs de réflexion et de transmission minima. Ces facteurs, d'autre part, varient avec la température obtenue sur la substance.

b) Le facteur d'absorption d'une substance réfléchissante peut être très amélioré en augmentant son état de division ou encore en le plaçant dans une enceinte corps noir.

c) Les facteurs d'ordre thermique qui interviennent sont la chaleur spécifique et la conductibilité thermique; cette dernière doit être aussi faible que possible. On peut la diminuer considérablement en augmentant l'état de division des substances.

### Traitements directs

La substance à traiter est placée directement au foyer du système convergent. Si l'axe du système est vertical et la convergence réalisée du haut vers le bas, on peut ainsi traiter en surface des produits pulvérulents ou fragmentés reposant sur eux-mêmes dans un creuset qui reste froid. Ces produits peuvent être portés à haute température sans contamination.

Le traitement direct peut être effectué sur une substance soumise à un déplacement latéral. On obtient ainsi un renouvellement de la surface traitée et la formation de barres fondues ou frittées de longueur indéfinie. Le rendement de l'opération est amélioré.

Le traitement direct peut être fait avec une installation à axe horizontal sur une surface cohérente, par exemple frittée. Il peut être fait avec apport continu de matière sur une surface fondue dont la partie sous-jacente se solidifie progressivement.

On peut calculer le temps  $t$  nécessaire pour porter à une température  $\theta$  une substance soumise à un éclairage énergétique donné :

$$\theta = \frac{2\phi}{\sqrt{\pi\lambda c\rho}} \sqrt{t}$$

où  $\phi$  = éclairage énergétique  
 $\lambda$  = conductibilité thermique  
 $c$  = chaleur spécifique  
 $\rho$  = densité.

Cette formule est valable pour le corps noir. Pour les corps non noirs, la valeur de  $\phi$  est à multiplier par leur facteur d'absorption. On a, pour la fusion de la zircone à 2 700°, un temps  $t$  de 3 secondes en accord avec les résultats expérimentaux. Pour les métaux plus conducteurs, les temps sont plus élevés.

### Traitement en cavité

La matière est placée dans une cavité fixe ou tournante qui reçoit le rayonnement convergent par un orifice de surface aussi faible que possible. A l'intérieur de cette cavité, les réflexions internes permettent une bonne absorption de l'énergie. Cette disposition est particulièrement favorable pour un traitement des substances réfléchissantes qui sont malaisées à porter à haute température par chauffage direct.

L'homogénéité de température dans les cavités chauffées par rayonnement solaire dépend normale-

ment de la nature des parois et du rapport entre la surface de l'orifice d'accès du rayonnement et la surface interne de la cavité. Un orifice de faible surface et une grande surface interne donnent des effets « corps noir » très marqués. Pour les substances présentant un coefficient d'absorption du rayonnement solaire supérieur de 10 à 20 p. 100, on peut augmenter la surface relative de l'orifice d'accès du rayonnement.

Au fur et à mesure que la température de la cavité s'élève, l'énergie qu'elle rayonne devient, pour une même énergie incidente, de plus en plus considérable.

La forme du four a également une grande importance, la paroi opposée à l'orifice étant ou non fortement éclairée suivant la profondeur du four.

Le facteur d'émission des substances augmentant, en général, avec la température, les pertes d'énergie sont plus élevées que celles que l'on pourrait déduire de la loi du rayonnement du corps noir en fonction de la température.

### Fours tournants dits fours centrifuges

Pour ces fours, constitués par des cavités cylindriques tournant autour de l'axe du cylindre, la vitesse est suffisamment grande pour que l'accélération centrifuge l'emporte sur les forces de gravité. Les substances sont maintenues sur les parois du cylindre et reçoivent le rayonnement solaire par un orifice axial. Les parois de la cavité sont refroidies par jet d'eau. Les fours centrifuges permettent de traiter les substances les plus diverses en profitant des deux avantages conjugués du traitement sans creuset, c'est-à-dire sans contamination, et du traitement en cavité.

Les parois des fours centrifuges doivent être constituées de métaux bon conducteurs de chaleur. L'aluminium et le cuivre, par exemple, résistent mieux que les aciers réfractaires, particulièrement à l'orifice des fours.

Les caractéristiques des fours centrifuges dépendent de l'usage que l'on désire en faire. Comme pour les traitements en cavité, les rapports profondeur/diamètre ont une grande importance.

Les fusions au four centrifuge s'effectuent le plus souvent sans grande surchauffe du produit fondu, le produit sous-jacent, par sa fusion progressive, absorbant, en général, les calories apportées.

Dans les opérations au four centrifuge, la cavité centrale, dans le cas le plus général, augmente avec le temps de traitement, l'épaisseur du calorifuge diminuant parallèlement.

Les brassages des produits fondus peuvent être obtenus par simple variation de la vitesse de rotation.

Pour éviter l'agrandissement exagéré de la cavité centrale, on peut recharger le four en cours d'opération.

La vitesse de fusion, relativement lente au début, croît, passe par un maximum et s'annule après un certain nombre d'heures de travail.

Les fours centrifuges sont d'une utilisation très générale pour les composés oxygénés, halogénés, ou

même les métaux, en réalisant un isolement thermique convenable des parois de la cuve.

### Essais en atmosphère conditionnée

Les essais en atmosphère conditionnée nécessitent l'emploi de parois transparentes au rayonnement solaire. Différents types de verres peuvent être utilisés, en particulier le verre Pyrex et le verre de silice. Le Pyrex laisse passer 85 p. 100 de l'énergie solaire et supporte un éclairage énergétique de l'ordre de 20 watts/cm<sup>2</sup>. La silice vitreuse laisse passer 80 p. 100 et supporte un éclairage énergétique de 500 watts/cm<sup>2</sup>. Pratiquement, en raison de condensations possibles, on prendra 5 et 50 watts/cm<sup>2</sup> comme densités énergétiques limites.

Diverses matières plastiques peuvent également convenir, mais les densités d'énergie sur leur surface doivent être plus faibles que pour les verres. Les matières plastiques sont plus utilisables pour les atmosphères conditionnées sous pression normale que sous vide.

Une méthode très commode pour opérer en atmosphère conditionnée sous la pression atmosphérique consiste à utiliser des tubes en matière plastique très mince gonflés par une faible surpression interne.

Les parois transparentes en verre ou en silice sont souvent obscurcies par des dépôts provenant de la volatilisation des produits traités. Il a été remarqué que ces dépôts se forment surtout dans les zones où n'intervient pas le rayonnement convergent. Il a été

montré, par diverses expériences, qu'il s'agissait d'un phénomène de photoluminescence primitive.

### Mesures physiques

#### Mesure de l'énergie utilisable

Cette mesure est faite à l'aide d'un calorimètre corps noir à circulation d'eau.

#### Mesures de température

Voir plus haut le mémoire N 66 de M. Fata.

#### Mesures de chaleurs spécifiques

Une méthode calorimétrique a été expérimentée jusqu'à 2.300 °C.

#### Études dilatométriques

La mesure de l'allongement d'un échantillon, chauffé dans un four corps noir, est réalisée par une méthode optique.

### Combinaison de l'énergie solaire et d'une autre forme d'énergie

Différents types d'apport d'énergie sont envisagés: flammes, générateurs à plasma, bombardement électronique, induction haute fréquence.

## TREATMENT CONDITIONS AND PHYSICAL MEASUREMENTS IN SOLAR FURNACES

### Summary

The choice of the method of treating a substance at the focus of a device concentrating energy from a high-temperature source depends on the characteristics of the substance treated and on the conditions under which it receives the radiation.

For concentrating solar energy, the systems employed most often comprise a plane orienting system illuminating a fixed parabolic mirror whose axis may be vertical, horizontal or inclined, according to the intended uses. It may also be useful to employ mirrors with dissymmetrically developed reflecting surface, in order to maintain a high density of energy on the receiving surface, if that surface is inclined with respect to the optical axis. Similarly, when a cylinder is to be heated, it may be desirable, in order to obtain the maximum energy concentration, to develop the apparent diameter  $D$  of the parabolic surface beyond the value  $4f$  ( $f$  = focal distance).

The relevant characteristics of the substance to be treated are both thermal and optical.

(a) The substance must have a maximum absorption factor for the radiation employed and minimum

reflection and transmission factors. These factors, on the other hand, vary with the temperature to which the substance is raised.

(b) The absorption factor of a reflecting substance may be very much improved by increasing its degree of division, or by placing it in a blackbody enclosure.

(c) The thermal characteristics to be considered are specific heat and thermal conductivity. The latter must be as low as possible. It can be decreased considerably by increasing the state of division of the substances.

### DIRECT TREATMENTS

The substance to be treated is placed directly at the focus of the convergent system. If the axis of the system is vertical and the convergent is downward, this method may be used for surface treatment of powdered or fragmented products resting on similar material in a crucible which remains cold. Such products may be brought to a high temperature without contamination.

A substance subjected to lateral displacement may be given direct treatment. In this way the treated surface is renewed, and fused or frittered bars of indefinite length are obtained. The efficiency of the operation is improved.

Direct treatment may be given, with an installation having a horizontal axis, to a coherent surface, fritted for instance.

Direct treatment may be accomplished with continuous addition of new material on to a molten surface whose underlying portion is progressively solidifying.

The time  $t$  necessary to bring to a temperature  $\theta$  a substance subjected to a given irradiancy may be calculated as follows :

$$\theta = \frac{2\phi}{\sqrt{\pi\lambda c\rho}} \sqrt{t}$$

where  $\phi$  is the irradiancy,  
 $\lambda$  the thermal conductivity,  
 $c$  the specific heat, and  
 $\rho$  the density.

This formula is valid for a black body. For other bodies, the value of  $\phi$  must be multiplied by the absorption factor. For the fusion of zirconia at 2700°C, this formula gives a time  $t$  of 3 seconds, in agreement with the experimental results. For metals with higher conductivity, the time is longer.

#### TREATMENT IN A CAVITY

The material is placed in a fixed or rotating cavity which receives the convergent radiation through an aperture of the smallest possible area. The internal reflections inside this cavity permit good absorption of the energy. This arrangement is especially favourable for treating reflecting substances, which are hard to bring up to high temperatures by direct heating.

The homogeneity of the temperature in cavities heated by solar radiation normally depends on the nature of the walls, and on the ratio between the area of the radiation-access aperture and the area of the internal surface of the cavity. An aperture of small area and a large internal area give very marked "blackbody" effects. For substances with an absorption coefficient of over 10 to 20 per cent for solar radiation, the relative area of the radiation-access aperture may be increased.

As the temperature of the cavity rises, the energy radiated by it at given incident energy becomes greater and greater.

The shape of the furnace is likewise very important, since the wall facing the aperture is strongly irradiated or not, according to the depth of the furnace.

The emission factor of a substance, as a rule, increases with its temperature, so that the energy losses are higher than would follow from the law of blackbody radiation as a function of temperature.

#### Rotating furnaces, called centrifugal furnaces

For these furnaces, which consist of cylindrical cavities rotating about the axis of the cylinder the velocity is sufficiently high for the centrifugal acceleration to exceed the gravitational forces. The material is thus held against the walls of the cylinder and receives the solar radiation through an axial aperture. The cavity walls are cooled by water jets. Centrifugal furnaces may be used to treat the most varied substances, profiting by the two associated advantages of treatment without a crucible — that is to say, without contamination — and of treatment in a cavity.

The walls of a centrifugal furnace must be made of a metal that is a good heat conductor. For example, aluminium and copper are more resistant than refractory steels, especially at the furnace aperture.

The characteristics of centrifugal furnaces depend on the desired use. As for treatments in a cavity, the depth/diameter ratio is very important.

Melting in a centrifugal furnace is most often accomplished without great superheating of the molten product, since the underlying product by reason of its progressive fusion, generally absorbs the excess heat transferred to it.

In centrifugal furnace operations, the central cavity, in the most general case, becomes larger with time of treatment, and the thickness of the thermal insulation decreases accordingly.

A molten product can be mixed by merely changing the rate of rotation.

To prevent excessive enlargement of the central cavity, the furnace may be charged during operation.

The rate of fusion is relatively slow at first. It then rises, passes through a maximum, and falls to zero after a certain number of hours of operation.

The centrifugal furnaces are of very general applicability for oxygen compounds, halogen compounds, and even for metals, provided the walls of the melting chamber are properly insulated.

#### CONTROLLED ATMOSPHERE EXPERIMENTS

Experiments in a controlled atmosphere require the use of walls transparent to solar radiation. Various types of glass may be used, especially Pyrex and silica glass. Pyrex passes 85 per cent of the solar energy and maintains an irradiancy of the order of 20 watts/cm<sup>2</sup>. Silica glass passes 89 per cent and maintains an irradiancy of 500 watts/cm<sup>2</sup>. Practically, owing to the possible condensation, 5 and 50 watts/cm<sup>2</sup> are taken as the limiting energy densities.

Various plastics may likewise be suitable, but the energy densities on their surface must be lower than for glass. Plastics are more usable for controlled atmospheres under normal pressure than in vacuum work.

A very convenient method for operating in a controlled atmosphere at atmospheric pressure makes

use of very thin-walled plastic tubes inflated by a slight internal overpressure.

Transparent walls of glass or quartz are often darkened by deposits due to the volatilization of the products treated. It has been noted that these deposits are formed primarily in zones not subjected to the convergent radiation. Various experiments have shown this to be due to a phenomenon of positive photophoresis.

#### PHYSICAL MEASUREMENTS

##### *Measurement of useful energy*

This measurement is performed by using a black-body calorimeter with water circulation.

##### *Temperature measurements*

See above, Paper S/66 by M. Foëx.

##### *Specific heat measurements*

A calorimetric method has been tried up to 2300°C.

##### *Dilatometric studies*

The elongation of a specimen heated in a black-body furnace is measured by an optical method.

#### COMBINATION OF SOLAR ENERGY AND ANOTHER FORM OF ENERGY

Various types of energy contributions are contemplated : flames, plasma generators, electron bombardment, high-frequency induction.

## PURIFICATION DES SUBSTANCES PAR CHAUFFAGE AU FOUR SOLAIRE

F. Trombe et M. Foëx \*

Les besoins en produits purs ont crû considérablement au cours de ces dernières années par suite du développement de certaines nouvelles branches de la technique (énergie atomique, semi-conducteurs, métaux et alliages spéciaux, etc.)

Les fours solaires, comme les fours à rayonnement pur, permettent de traiter les substances à haute température sans les contaminer. Il était donc tout à fait indiqué d'utiliser ce type de four pour procéder à des essais de purification par différents procédés thermiques.

\* Laboratoire de l'énergie solaire du Centre national de la recherche scientifique, Mont-Louis, Pyrénées-Orientales, France.

### Distillation et volatilisation

Tout d'abord, de nombreux traitements thermiques à haute température sont accompagnés d'effets de volatilisation importants, qui peuvent affecter soit le produit principal, soit les impuretés qu'il peut contenir. Ainsi les distillations de l'anhydride molybdique  $\text{MoO}_3$  ou de l'anhydride tungstique  $\text{WO}_3$  permettent d'obtenir ces oxydes à l'état pur. Mais cette méthode de purification s'applique plus souvent à des produits fortement réfractaires peu volatils, perdant par traitement thermique les impuretés qu'ils contiennent. Certains produits, par exemple, se purifient ainsi par simple fusion ou trai-

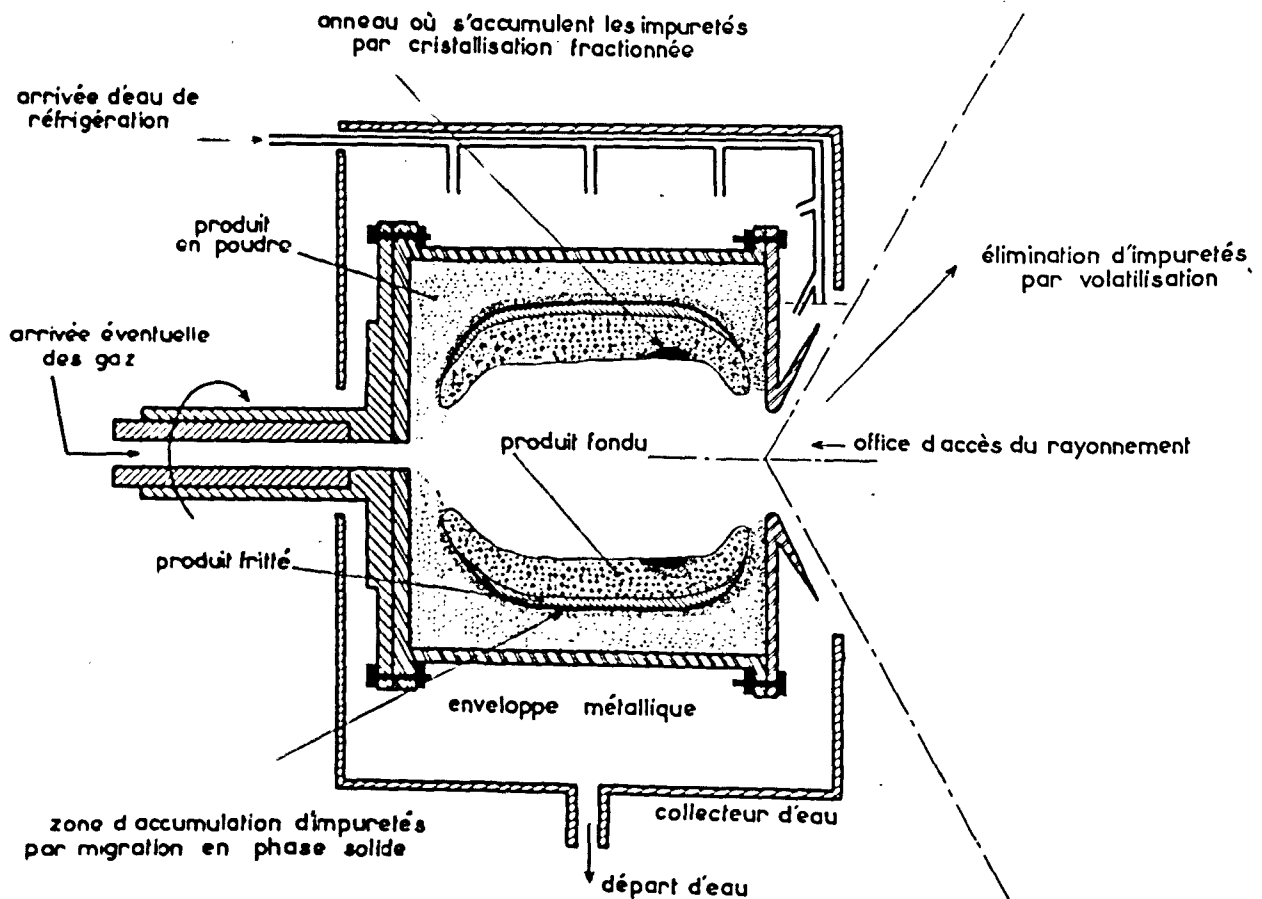


Figure 1. Purification d'un produit par traitement au four solaire centrifuge



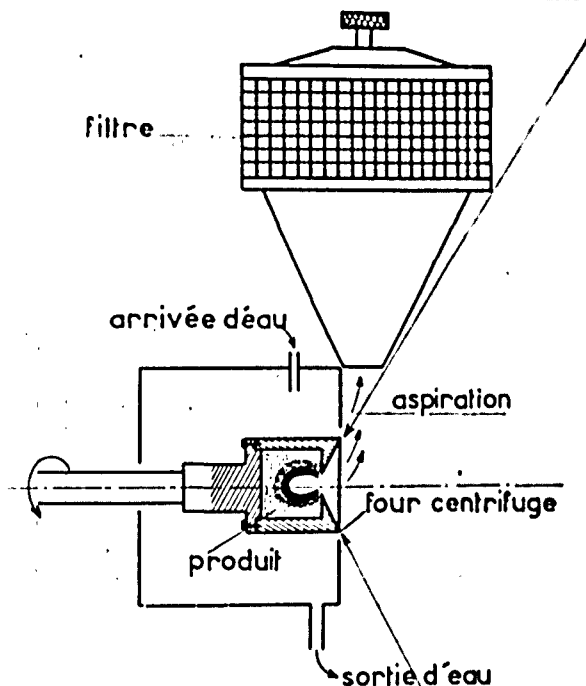


Figure 2. Purification d'un produit avec récupération des matières volatilisées au moyen d'un aspirateur filtre

tement à haute température au four solaire. Il en est ainsi des oxydes très réfractaires comme la magnésie (point de fusion 2 800 °C) ou de l'oxyde de thorium (point de fusion 3 050 °C). La méthode est applicable aussi à des oxydes moins réfractaires, mais extrêmement peu volatils, comme l'alumine (point de fusion 2 050 °C); les traitements sont alors de plus longue durée. Certains produits réfractaires (oxyde de chrome, oxyde de cérium) étant par contre très volatils à haute température, il peut être intéressant de procéder à la distillation fractionnée de mélanges les contenant.

Les purifications du type précédent sont, évidemment d'autant plus rapides que la surface d'échange entre la masse traitée et l'atmosphère qui l'entoure est relativement plus grande. Une élimination rapide des impuretés en phase vapeur est un facteur favorable, on peut y parvenir par des traitements sous vide ou par un renouvellement de gaz au contact du produit traité.

En effet, de nombreuses substances présentent aux températures de traitement, entre 1 500 et 2 500

à 3 000 °C, des pressions de vapeurs importantes, mais souvent inférieures à la pression atmosphérique qui existe le plus souvent à la surface du produit traité.

Un procédé de purification consiste à mélanger intimement au corps à purifier un produit susceptible de s'éliminer complètement à haute température, mais restant stable jusqu'à une température suffisante pour que les tensions de vapeur des impuretés à éliminer soient notables. On produit alors au sein de la masse traitée un dégagement important de gaz dans lequel les impuretés prennent les pressions partielles que leur assigne leur tension de vapeur à la température où s'effectue l'opération. Le gaz entraîneur élimine aussi des impuretés qui n'auraient pu quitter le corps à purifier que par diffusion, jusqu'à sa surface. Dans le cas où les réactifs utilisés, solides ou liquides à la température ordinaire, se volatilisent à basse température, on peut utiliser rationnellement le gradient de température existant dans les fours centrifuges, et le produit entraîneur est progressivement vaporisé au fur et à mesure que la fusion ou le frittage progresse vers la périphérie du four. Le produit traité présentant un gradient de température considérable, il existe à chaque instant une zone portée à la température la plus favorable à l'action des vapeurs formées sur le réactif utilisé, cette température est dans bien des cas inférieure à la température maximum atteinte dans la zone centrale fondeuse ou frittée. Les impuretés sont éliminées, soit dans la partie centrale du four et par l'effet d'aspiration du rayonnement, soit à travers la masse prévalente vers les zones périphériques moins chaudes.

La nature de l'atmosphère elle-même joue un rôle important dans de tels phénomènes, certains produits volatils pouvant être formés. Les atmosphères oxydantes favorisent ainsi le départ de l'oxyde de protoxyde, contenu dans les sesquioxides de terres rares ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ , etc.), par suite de la formation de composés plus oxygénés que  $\text{Pr}_2\text{O}_3$ . Bien plus souvent encore, une atmosphère réductrice provoque la formation de composés moins oxygénés volatils (SO) à partir de  $\text{SiO}_2$  par exemple; mais une atmosphère gazeuse (hydrogène ...) ne suffit généralement pas, et il faut faire intervenir des réducteurs solides ou liquides plus énergiques. Les atmosphères à base d'halogènes ou de composés halogénés ont aussi souvent une action intéressante. Enfin, notons le cas de la vapeur d'eau qui provoque une telle volatilisation dans certains cas (oxyde de beryllium).

Les réactifs utilisés pour donner des composés volatils avec les impuretés ou pour les extraire, peuvent aussi être introduits à l'état gazeux ou à l'état de vapeur par un orifice pratiqué dans l'axe des fours centrifuges (figure 1).

La figure 2 donne le schéma de principe d'un four à axe horizontal associé à un aspirateur filtre, constitué par un papier filtre plissé et placé dans une cage cylindrique tournant à une vitesse suffisante (1 400 tours minute), un manchon trompeur d'aluminium permet de capter les vapeurs à la sortie même du four. Dans un autre dispositif, avec un four

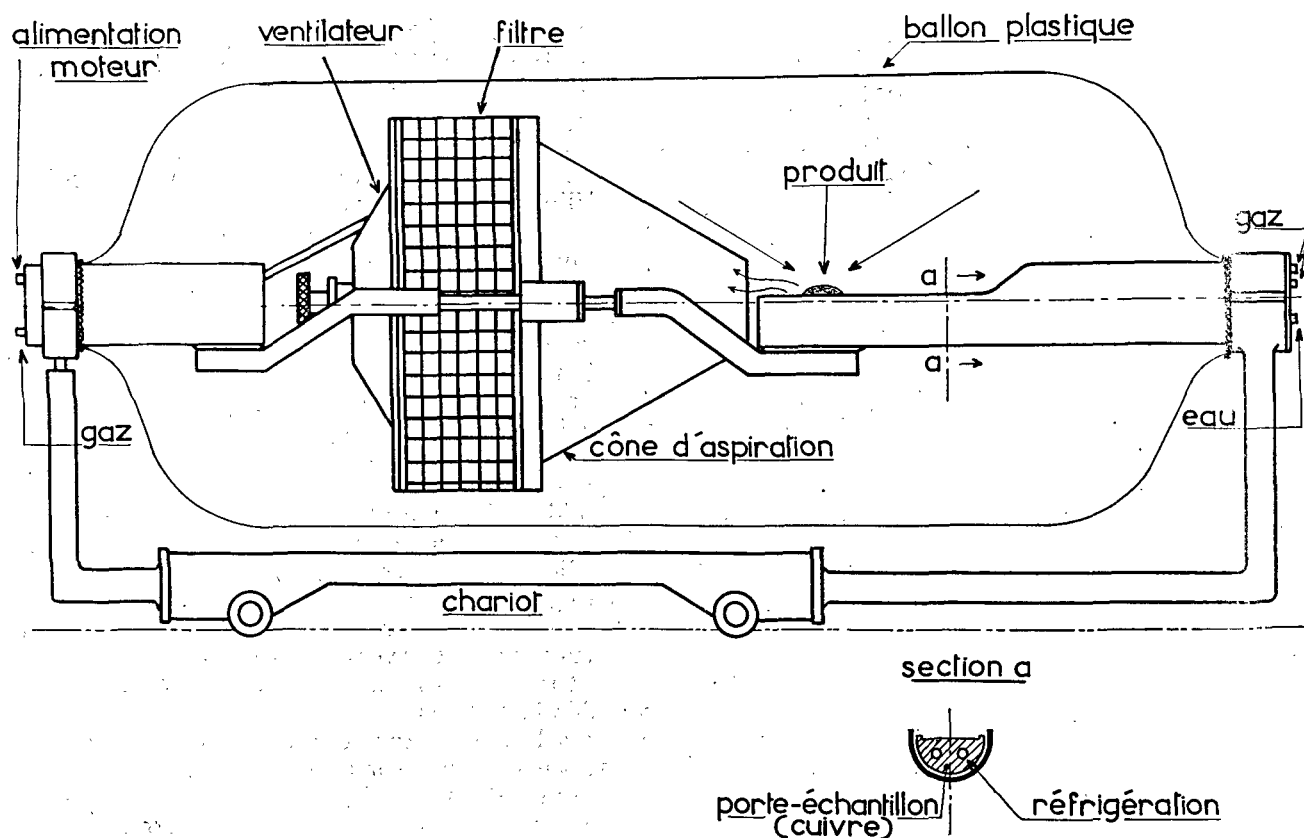


Figure 3. Purification au four solaire d'un produit placé en atmosphère conditionnée, sous enveloppe de plastique transparent

solaire à axe vertical (figure 3), on opère en atmosphères variées, sous la pression ambiante à l'intérieur d'une gaine de plastique transparent de 5/10 de mm. d'épaisseur. Cette gaine est fixée à ses deux extrémités sur des tubes métalliques, la liaison étant rendue étanche par des bandes de plastique adhésif. Le ballon de plastique ainsi formé est gonflé à l'aide du gaz choisi. Une pression d'une dizaine de centimètres d'eau suffit pour lui donner une forme stable. Une plaque métallique réfrigérée, destinée à supporter le produit traité, est placée entre les deux tubes et soudée à chacun d'eux. Les tubes fermés à leurs extrémités sont traversés par des tubulures d'arrivée et de sortie de gaz et d'eau de réfrigération de la plaque. L'ensemble placé sur un chariot est disposé sur des rails permettant de l'amener en position convenable pour traiter la substance au foyer d'un four solaire d'axe vertical d'une puissance de 2 kW.

Le produit à traiter est placé sur la plaque métallique réfrigérée, cependant que les vapeurs formées sont recueillies par un aspirateur muni de filtres sans cendres. En cours d'opération, il est bon de maintenir une légère circulation de gaz de façon à évacuer les produits de réactions non condensables. Différents gaz sont susceptibles d'être employés, et en particulier l'azote, l'hydrogène ou l'oxygène. L'eau formée lors des traitements de certains produits dans l'hydrogène peut être absorbée par des substances dessé-

chantes placées dans l'enceinte de plastique même, soit dans le corps de l'aspirateur, soit à sa sortie.

### Migration des impuretés depuis les zones portées à haute température vers les zones plus froides

Il s'agit là d'un phénomène de thermolyse en rapport avec la mobilité relative des ions; il est observable à l'état liquide ou en solutions solides, et est analogue à l'effet Ludwig Soret. Dans tous les cas, les impuretés provenant des zones très chaudes se concentrent dans les zones à température moyenne, les zones solides froides ne permettant pas aux ions de migrer avec une vitesse appréciable. Des équilibres se produisent entre les différentes zones portées à diverses températures.

### Cristallisation fractionnée

On note lors du refroidissement lent de masses fondues un phénomène de ségrégation, les impuretés se rassemblant pour une large part dans les dernières zones restant à l'état fondu. Une méthode très simple et efficace pour réaliser une telle opération consiste à placer au foyer d'un four solaire à axe vertical une

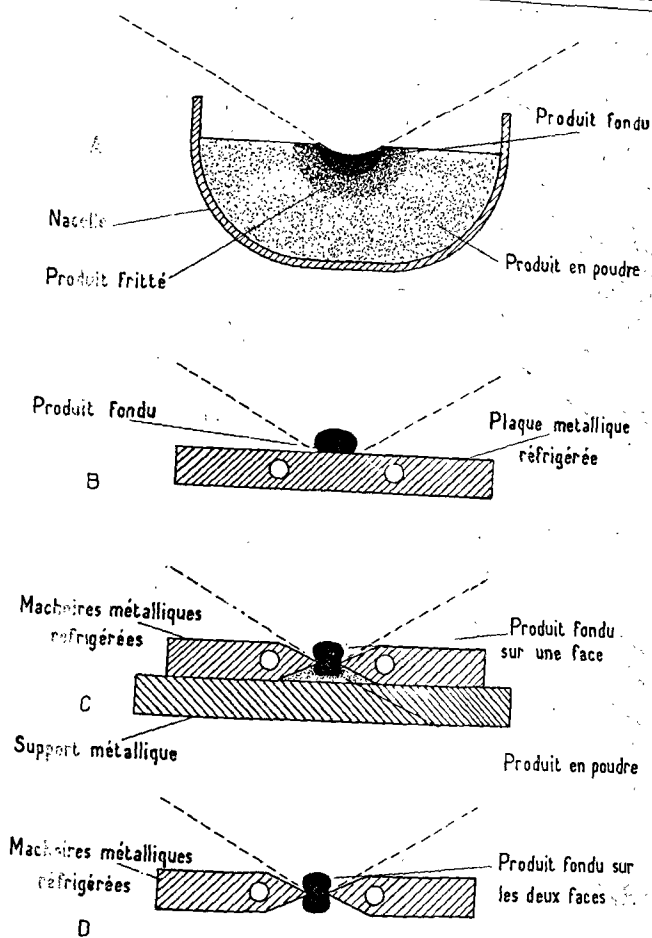


Figure 4. Purification de produits par fusion de zone : A) produit fondu reposant sur la poudre qui lui a donné naissance; B) produit fondu placé sur une plaque métallique réfrigérée; C) et D) produit maintenu entre mâchoires métalliques réfrigérées

masse de produit supportée par une plaque métallique réfrigérée. Le refroidissement lent est réalisé soit en éloignant progressivement la masse du foyer, soit de préférence en obturant peu à peu le rayonnement au moyen d'un écran. Dans ce dernier cas, les impuretés se rassemblent au sommet du globule fondu (quelques grammes pour un four de 2 kW); en retournant le produit, on fond la faible partie de la masse qui n'avait pas été traitée au début de l'opération.

Des refroidissements très lents s'obtiennent aussi dans les fours centrifuges, surtout dans ceux utilisés avec l'installation de 50 kW de Mont-Louis, qui permettent de traiter couramment de 20 à 100 kg d'oxydes réfractaires.

On note une accumulation des impuretés dans la dernière zone fondue, formant un anneau très nettement situé à l'intérieur du four vers l'avant, dans la région recevant directement le maximum de rayonnement solaire.

L'excellence des effets de cristallisation fractionnée observés lors des solidifications progressives de pro-

duit fondu au four centrifuge s'explique par le brassage de la masse fondue qui est continuellement homogénéisée, le gradient de température du centre à la périphérie, et de direction continuellement variable existant dans la masse liquide provoquant des échanges progressifs. Il n'y a donc pas d'accumulation des impuretés au voisinage du produit solide jusque vers la fin de la fusion.

La dernière phase solidifiée est souvent de même nature cristalline que la masse principale, les impuretés s'y trouvant en solution solide, ainsi qu'on l'observe généralement dans le cas des oxydes réfractaires, comme l'alumine et la zircone. Cependant, dans certains cas, surtout en présence de quantités suffisantes de certaines impuretés, il y a formation d'une ou plusieurs autres formes cristallines avec eutectiques entre ces phases et la phase principale. Au cours des cristallisations fractionnées, il est possible de faire tourner très rapidement les fours (5 000 tours/minute par exemple, et plus) afin d'obtenir des effets de centrifugation.

On note aussi le plus souvent la formation d'une zone riche en impuretés à l'intérieur du produit fritté, qui se forme généralement au contact de la masse fondue.

### Zone fondue

Le chauffage au foyer des fours solaires permet de réaliser très aisément les opérations de zone fondue. Les questions de creusets, si difficiles à résoudre dans certains traitements de ce type, ne se posent pas ici.

Cette méthode s'applique surtout aux produits réfractaires relativement peu conducteurs de la chaleur, comme les oxydes, plutôt qu'aux métaux. Dans un premier procédé, le produit initialement en poudre est fondu superficiellement dans une nacelle défilant horizontalement au foyer d'un miroir parabolique à axe vertical (figure 4 A).

La baguette de produit ainsi formée (20 à 50 cm de longueur), qui repose sur la poudre sous-jacente inaltérée, est purifiée en réalisant une série de fusions par zones successives.

Afin d'éviter le contact souvent préjudiciable du produit traité avec la poudre de départ, moins pure, il est possible de placer les baguettes sur une plaque métallique réfrigérée en aluminium ou en cuivre. On retourne la baguette après chaque passage (figure 4B).

Cependant, dans la plupart des cas, les baguettes subissent une torsion importante au cours des traitements, une mince couche de produit situé au contact de la plaque réfrigérée restant solide.

On évite cet inconvénient en formant la baguette entre deux mâchoires métalliques réfrigérées (figures 4 C et 4 D et figure 5). La poudre repose avant fusion sur une plaque métallique auxiliaire sous-jacente (figure 4 C) qui est enlevée après formation de la baguette; on effectue alors la fusion par zone en traitant alternativement une face, puis l'autre (figure 4 D). Le produit fond sensiblement entière-

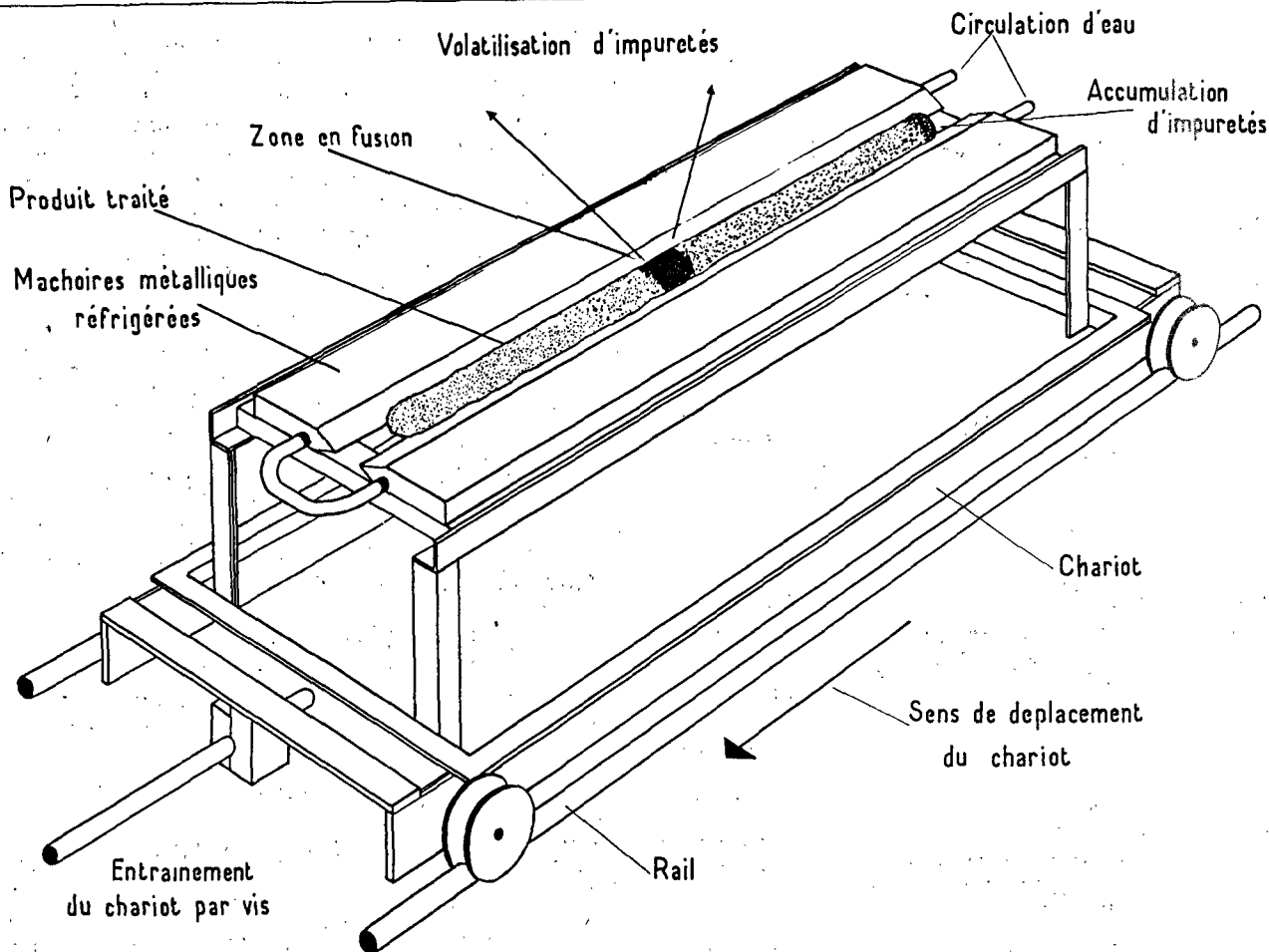


Figure 5. Purification par zone fondue d'un produit réfractaire, pris entre mâchoires métalliques réfrigérées

ment au cours des passages successifs sur les deux faces. Les pertes d'énergie dans la masse métallique et l'eau de réfrigération sont très faibles et ne dépassent guère 20 p. 100 de l'énergie totale incidente. On note souvent une surchauffe considérable du produit et une forte volatilisation, provoquant généralement une purification importante.

La distance entre les mâchoires est comprise entre 6 et 10 mm, le produit fondu ayant lui-même une largeur de 8 à 12 mm pour une installation comportant un miroir parabolique d'axe vertical de 2 mètres de diamètre et de 85 cm de distance focale.

La vitesse de défilement doit être telle que la diffusion dans la zone fondue soit beaucoup plus rapide que la diffusion dans la zone solide. La vitesse de solidification doit donc être beaucoup plus rapide que la vitesse de diffusion à l'état solide, mais suffisamment lente pour permettre une diffusion raisonnable des impuretés dans la zone fondue. Il est à noter que la température de la zone liquide soumise à l'action du rayonnement solaire n'est pas homogène, mais que l'on note une surchauffe assez considérable au milieu et en surface de la zone fondue, ce qui a pour effet d'augmenter considérablement les effets de convection et le brassage de la matière fondue.

Enfin, des moyens mécaniques (vibrations) permettraient aussi de favoriser cette homogénéisation. La vitesse de défilement utilisée doit être celle donnant la meilleure séparation pour un temps déterminé de travail. Nous avons pratiquement utilisé des vitesses comprises entre 50 et 200 mm/heure.

La longueur de la zone fondue est en grande partie conditionnée par l'appareil de concentration d'énergie utilisé. Avec un miroir de 2 mètres de diamètre et de 85 cm de distance focale, la zone portée à haute température peut atteindre 12 à 15 mm de longueur. Cependant, l'éclairement énergétique sur le plan focal n'étant pas homogène, mais plus considérable au centre, la quantité de matière fondue est maximum au centre et décroît vers les bords, ce qui a pour effet de provoquer dans ces régions un gradient de température de bas en haut, et une certaine accumulation des impuretés sur le dessus de la baguette. Afin d'éviter cet effet, il convient de ne pas utiliser le rayonnement venant du miroir parabolique et atteignant le produit sous de faibles angles, tout au moins dans le sens de déplacement de la baguette (figure 6). Une masse métallique réfrigérée judicieusement disposée permet de mieux définir le front de solidification.

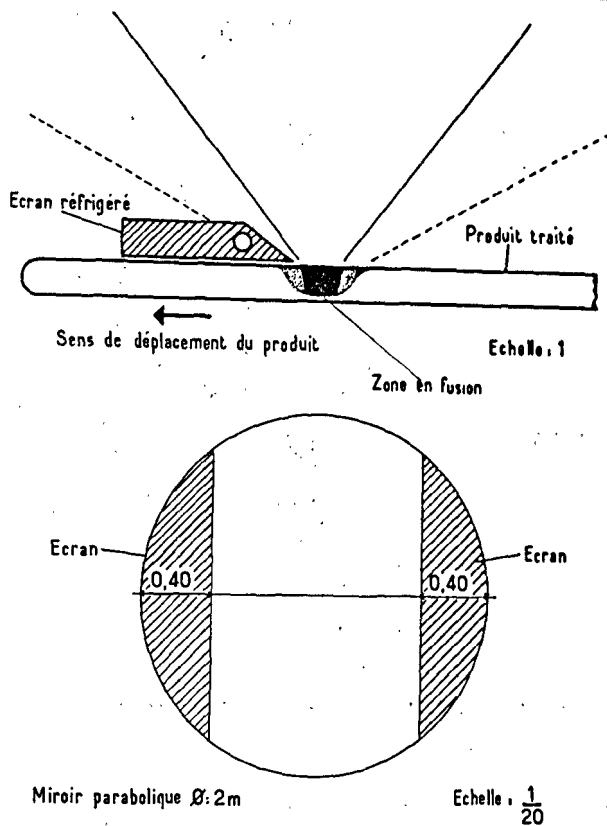


Figure 6. Dispositif d'écrans permettant d'améliorer la purification par zone fondue (ouverture du miroir parabolique diminuée)

Un dispositif très intéressant pour la fusion par zone de quantités importantes de produit, consiste à placer le produit dans un boîtier réfrigéré démontable (figure 7).

Il est possible également de fondre par zone une baguette verticale (suivant la méthode de la zone flottante) en la faisant tourner sur elle-même (figure 8), mais très souvent les produits fondus ainsi traités coulent. L'emploi des mâchoires réfrigérées évite cet inconvénient (zone en cage). Cette méthode favorise les séparations de produits de différentes densités, ainsi que le transfert des impuretés par convection dans la masse liquide. En outre, les effets de purification par volatilisation sont très importants dans les traitements par zone fondue à haute température. Les baguettes traitées ne doivent pas avoir un diamètre trop élevé, afin de réaliser des éclaircissements énergétiques superficiels assez importants. Des miroirs de très grande ouverture (4 f et même plus) donneraient, dans ce cas particulier, de meilleurs résultats que ceux actuellement utilisés (environ 2 f).

### Extraction

Une troisième méthode, dérivée de celle de Kyropoulos, consiste à extraire la substance fondue à l'aide d'une amorce de substance, le produit extrait

en tête étant le plus pur. Afin de renouveler la matière fondue, dont le volume est nécessairement très réduit dans le cas d'un four solaire de petite puissance, on fait défilier la substance sous le rayonnement comme il est indiqué (figure 9). Lorsque l'extraction s'avère impossible, l'extrémité de la baguette fondant au contact du produit liquide, on peut avoir recours à l'un des dispositifs suivants : 1) élever autant que possible le niveau du produit au-dessus du foyer; 2) diminuer l'ouverture du miroir parabolique afin de limiter l'action des rayons périphériques venant frapper la baguette verticale; 3) donner à la baguette un mouvement vertical de va-et-vient permettant d'extraire de petites quantités de produit.

### Quelques exemples de traitements de purification

Nous allons examiner plus spécialement le cas de l'alumine, un des oxydes réfractaires les plus importants.

L'alumine est trop peu réfractaire pour que l'on obtienne à son point de fusion (2 050 °C) une élimination rapide des impuretés, sans prendre de précautions spéciales. Ainsi les traitements au four centrifuge sont considérablement améliorés, en ce qui concerne la purification, par addition de certains réactifs chimiques, la teneur en fer et titane est réduite au dixième ou au vingtième de sa valeur initiale par addition de composés halogénés : tétrachlorure de carbone et surtout chlorure d'ammonium, ce dernier étant plus facile à manier. La silice est éliminable par addition de produits réducteurs (carbone, aluminium) provoquant la formation de protoxyde de silicium (volatil). L'anneau central brun foncé formé lors du refroidissement lent des fusions d'alumine se présente sous l'aspect d'une couche de quelques millimètres d'épaisseur moyenne, et ne recouvre qu'une faible partie de la surface

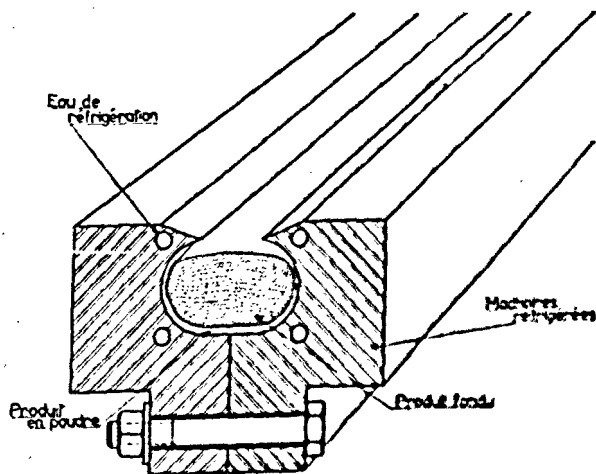


Figure 7. Purification par zone fondue d'un produit placé dans un boîtier métallique réfrigéré

interne du corindon. Ce produit peut être séparé par triage au moment du concassage.

En ce qui concerne l'oxyde de sodium, engagé sous forme d'aluminate ( $11 \text{ Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Na}_2\text{O}$  ou alumine  $\beta$ ), on note, même en l'absence de toute addition, un départ progressif de ce produit. Mais la présence de certains réactifs accélère considérablement ce phénomène. Il en est ainsi avec les agents réducteurs, tels que le carbone ou l'aluminium, susceptibles de provoquer, à haute température, la formation de sodium volatil. Les procédés les plus efficaces semblent être ceux utilisant des agents chlorurants (chlorure d'ammonium et tétrachlorure de carbone) susceptibles d'agir également par réduction; le sodium serait alors éliminé surtout sous forme de chlorure de sodium, moins volatil que le sodium métallique, mais moins susceptible que ce dernier de reformer par oxydation de l'oxyde de sodium et de l'aluminate de sodium.

L'oxyde de sodium, même à l'état de traces, intervient particulièrement sur la conductibilité électrique de l'alumine. Son élimination permet d'augmenter considérablement la résistance électrique de l'alumine, ce qui peut être précieux lors de son utilisation pratique dans les fours électriques.

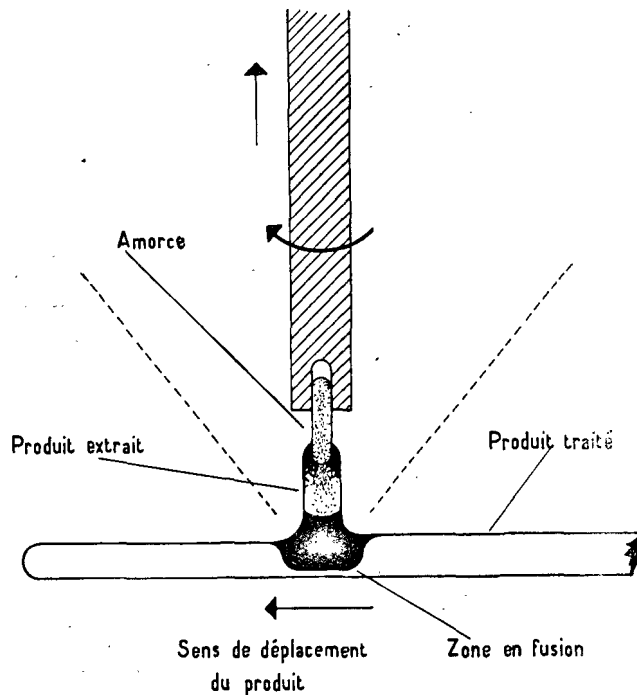


Figure 9. Purification d'un produit par extraction

L'absence d'oxyde de sodium, et, partant d'alumine  $\beta$  beaucoup moins dure que le corindon, est un facteur favorable pour l'obtention de masses homogènes d'alumine très dure, particulièrement abrasive.

Après deux cristallisations successives effectuées par la méthode précédente, la teneur en oxyde de fer et oxydes de titane ou silice peut être abaissée dans chaque cas de 0,1 p. 100 environ à quelques cent millièmes.

Les traitements par zone fondue donnent de bons résultats, aussi bien avec l'alumine, qu'avec les spinelles variés, l'oxyde de zirconium ou le zirconate de calcium.

### Conclusion

Les fours solaires semblent avoir un avenir prometteur pour la préparation de produits purs de haute définition physique et chimique. L'importance de ces produits, souvent coûteux, ne cesse de croître avec l'évolution des techniques modernes.

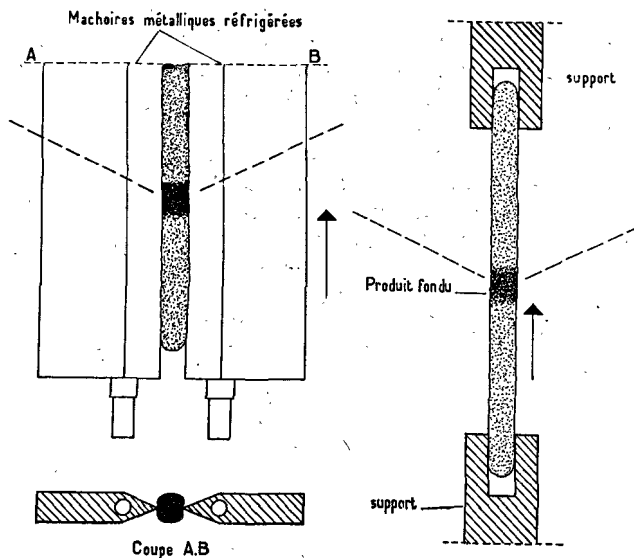


Figure 8. Purification d'un produit : par zone flottante (à droite), par zone en cage (à gauche)

### Références

1. Trombe, F., et Foëx, M., Purification de quelques substances réfractaires par traitement au four solaire, *C.R. Acad. Sci.* 238, 1419, 1954.
2. Trombe, F. et Foëx, M., *Les Différents Aspects de la purification des oxydes réfractaires au four solaire*, 16<sup>e</sup> Congrès international de chimie pure et appliquée, 571, Sedes, Paris, 1957.
3. Trombe, F. et Foëx, M., Sur le corindon pur fondu au four solaire, *Bulletin de la Société française de céramique*, n° 43, 69, 1959.

### Résumé

Les fours solaires permettent de traiter les substances à haute température sans les contaminer. Il était donc tout à fait indiqué d'utiliser ce type de four pour procéder à des essais de purification par différents procédés thermiques.

De nombreux traitements thermiques sont accompagnés d'effets de volatilisation importants concernant soit les impuretés d'un corps, soit parfois le corps lui-même (par exemple l'anhydride molybdique peut être distillé et séparé de ses impuretés moins volatiles). Par contre, pour beaucoup de réfractaires entre 2 000 et 3 000 °C, le processus inverse est employé, le produit à purifier reste pratiquement fixe, et les impuretés sont éliminées par volatilisation. L'élimination rapide de ces impuretés en phase vapeur est favorisée par traitement sous vide ou encore par un renouvellement des gaz au contact du produit traité.

Un excellent procédé de purification consiste à mélanger intimement au corps à purifier un produit susceptible de s'éliminer complètement à haute température en entraînant les impuretés.

La nature de l'atmosphère utilisée (oxydante, neutre, réductrice, chlorurante, etc.) joue également un rôle important.

On note dans les produits solides une migration des impuretés depuis les zones à très hautes températures vers celles à températures moins élevées.

Lors du refroidissement lent des masses fondues, il se produit un phénomène de ségrégation, les impuretés se rassemblant pour une large part dans les dernières zones restant à l'état fondu. Des phénomènes de ce genre s'observent aisément dans les fours solaires centrifuges susceptibles de traiter des masses de produits importantes, par exemple avec l'installation de 50 kW de Mont-Louis, qui permet ainsi de traiter 20 à 100 kg d'oxydes réfractaires en une seule opération.

Le chauffage au foyer des fours solaires permet de réaliser très aisément les opérations de zone fondue.

Les questions de creusets, si difficiles à résoudre dans certains traitements, ne se posent pas ici. Dans un premier procédé, le produit initialement en poudre est fondu superficiellement dans une nacelle défilant horizontalement au foyer d'un miroir parabolique à axe vertical. Une autre technique voisine consiste à maintenir le produit traité entre deux mâchoires métalliques réfrigérées. Le déplacement de la baguette s'effectue horizontalement ou verticalement, et la vitesse de défilement doit être suffisamment lente pour permettre une diffusion notable des impuretés dans la zone fondue. Avec un miroir de 2 mètres de diamètre et de 85 cm de distance focale, la zone portée à haute température peut atteindre 10 mm de large et 12 à 15 mm de long. Nous avons utilisé des vitesses de défilement comprises entre 50 et 200 mm/heure.

Une méthode dérivée de celle de Kyropoulos consiste à extraire la substance fondue à l'aide d'une amorce de produit solide, le produit extrait en tête étant le plus pur. Afin de renouveler la matière fondue, dont le volume est nécessairement très réduit dans le cas d'un four solaire de petite puissance, on fait défiler la substance sous le rayonnement.

Ce mémoire donne enfin quelques exemples de traitements de purification, et examine plus spécialement le cas de l'alumine, un des oxydes réfractaires les plus importants. Les petites quantités d'oxydes de fer, de titane, la silice et l'oxyde de sodium présents dans l'alumine sont éliminés par addition de certains réactifs : carbone, tétrachlorure de carbone et surtout chlorure d'ammonium. Les corindons purs ainsi obtenus présentent des propriétés particulières, du fait de l'absence d'oxyde de sodium; en particulier, leur résistance électrique est beaucoup plus élevée que celle des corindons ordinaires, et leurs propriétés abrasives sont meilleures.

Les fours solaires semblent avoir un avenir prometteur pour la préparation de produits purs de haute définition physique et chimique. L'importance de ces produits, souvent coûteux, ne cesse en effet de croître avec l'évolution des techniques modernes.

## PURIFICATION OF SUBSTANCES BY HEATING IN A SOLAR FURNACE

### Summary

Solar furnaces permit the high-temperature treatment of substances without contaminating them. The use of furnaces of this type is thus entirely indicated in experiments on purification by various thermal procedures.

Numerous heat treatments are accompanied by a substantial degree of volatilisation of the impurities, or sometimes of the substance itself (for example, molybdic anhydride may be distilled to separate it from the less volatile impurities). On the other hand, for many refractories, the reverse process is used between 2000 and 3000°C. The product to be

purified remains practically fixed, while it is the impurities that are removed by volatilisation. The rapid removal of these impurities in the vapor phase is favored by vacuum treatment or by replenishment of the gases in contact with the product treated.

An excellent purification method consists in the intimate mixture of the substance to be purified with a substance that will be completely removed at high temperatures, carrying the impurities off with it.

The nature of the heating atmosphere (oxidizing, neutral, reducing, chloridizing, etc.) likewise plays an important part.

In solid products, we note the migration of impurities from the zones at very high temperatures into zones at lower temperatures.

The phenomenon of segregation occurs during the slow cooling of molten masses. The impurities collect largely in the last zones still remaining liquid. Phenomena of this kind are easily observed in centrifugal solar furnaces of high capacity, for instance in the 50 kW plant at Mont-Louis, which can handle 20 to 100 kg of refractory oxides in a single operation.

Heating at the focus of a solar furnace permits very easy conduct of operations in the molten zone. Crucible problems, so difficult to solve in certain treatments, do not arise here. In the first stage, the product in powder form is melted superficially in a boat passing horizontally through the focus of a vertical-axis parabolic mirror. Another very similar technique is to keep the product treated between two cooled metal jaws. The rod is moved horizontally or vertically at a speed slow enough to permit considerable diffusion of the impurities in the molten zone. With a mirror 2 m in diameter and a focal length of 85 cm, the zone brought to a high temperature may be 10 mm wide and 12-15 mm long. We have used travel rates of 50 to 200 mm/h.

A method derived from that of Kyropoulos consists in the extraction of the molten substance by seeding with the solid substance. The product removed at the head is of higher purity. To replenish the molten material, whose volume is necessarily very small in the case of a small solar furnace, the substance is passed under the radiation.

The paper finally gives several examples of purification treatments, especially of alumina, one of the most important refractory oxides. The small quantities of oxides of iron and titanium present in the alumina, together with the silica and soda, are removed by adding certain re-agents — carbon, carbon tetrachloride, and above all ammonium chloride. The pure corundums so obtained have peculiar properties due to the absence of oxygen. In particular, they have a much higher electrical resistance than ordinary corundums, and their abrasive properties are better.

Solar furnaces appear to have a promising future for the preparation of pure products with very definite physical and chemical properties. The importance of these products, which are often expensive, is continually increasing with the development of modern technology.



## LES APPLICATIONS PRATIQUES ACTUELLES DES FOURS SOLAIRES ET LEURS POSSIBILITÉS ÉCONOMIQUES DE DÉVELOPPEMENT

F. Trombe et M. Foëx \*

### Traitement des oxydes et composés oxygénés réfractaires

Les opérations les plus simples qu'il soit possible de réaliser avec les fours solaires sont les traitements en milieu oxydant, dans l'air ambiant. C'est précisément l'opération la plus difficile à effectuer avec d'autres moyens de chauffage, avec les fours électriques en particulier, surtout au-dessus de 2 000 °C.

Nous examinerons tout d'abord les principaux types de traitements susceptibles de recevoir, ou ayant parfois déjà reçu, des applications pratiques, avec des fours de petite puissance (2 kW) et de puissance moyenne (50 kW). Une deuxième partie est consacrée aux prévisions qu'il est actuellement possible de faire concernant les fours de plus grande puissance (1 000 kW).

Les opérations en milieu oxydant conviennent bien au traitement de nombreux oxydes et produits à base d'oxydes réfractaires. Ces traitements ont reçu un début d'application pratique au Laboratoire de l'énergie solaire de Mont-Louis et seront susceptibles de prendre une certaine extension industrielle, au moment où des fours d'une puissance de l'ordre de 1 000 kW entreront en service.

Il convient tout d'abord de citer la *fusion de l'alumine* au four centrifuge<sup>1</sup> en vue d'obtenir du corindon. Cette fusion, qui s'effectue avec une installation de 50 kW avec une vitesse maximum de l'ordre de 15 kg/heure, permet d'obtenir dans certaines conditions (voir plus haut le mémoire S/52 relatif aux purifications) un produit beaucoup plus pur que le corindon électrofondu et, en particulier, exempt d'oxyde de sodium. Ce produit est susceptible de présenter des applications intéressantes comme abrasif ou comme réfractaire électriquement isolant à haute température.

Associé à la chaux, l'alumine peut aussi servir à la préparation des ciments réfractaires à base d'*aluminate de calcium*, ces ciments pouvant être ensuite associés au corindon pour la confection de bétons réfractaires. Le prix actuel de l'alumine Bayer est de l'ordre de 0,60 NF le kg, celui du corindon blanc électrofondu de 1 NF le kg et celui de l'aluminate de calcium fondu d'environ 1,50 NF le kg. On pourrait abaisser le prix de revient en substituant à l'alu-

mine Bayer de la bauxite blanche d'un prix très inférieur (0,05 NF le kg).

Le Laboratoire de l'énergie solaire de Mont-Louis a réalisé pour des applications industrielles le frittage de quantités relativement importantes d'*oxyde de zirconium* ou de *composés réfractaires à base d'oxyde de zirconium*. Des quantités de l'ordre de 10 tonnes ont été ainsi frittées et vendues par le Centre national de la recherche scientifique à des sociétés spécialisées dans la confection de pièces céramiques très réfractaires. Ces pièces céramiques sont essentiellement destinées à des applications de laboratoire, la production actuelle ne permettant pas encore de confectionner, par quantités, des briques ou des pièces de grandes dimensions susceptibles de recevoir des applications pour la confection de parois de fours industriels, électriques ou autres, où ces réfractaires pourraient se trouver au contact de produits fondus (métaux, verres, etc.) parfois corrosifs.

L'oxyde de zirconium est en effet un des oxydes présentant le plus de possibilités d'avenir dans le domaine des produits ultra-réfractaires, par suite d'une part de ses propriétés (point de fusion élevé : 2 700 °C, bonne résistance à de nombreux agents chimiques, et d'autre part de l'abondance relative de ses minerais dans la nature (zircon  $\text{SiO}_2\text{Zr}$  principalement). Les traitements au four centrifuge permettent de préparer des masses d'oxyde fritté de l'ordre de 60 kgs en six heures de traitement. Notons que le frittage doit être effectué en présence d'oxydes (chaux principalement), susceptibles, en passant en solution dans l'oxyde de zirconium, de supprimer ses transformations allotropiques et de lui conférer une forme stable à toutes températures. Les produits obtenus sont plus purs que ceux préparés par électrofusion du zircon en présence de carbone et de fer (élimination de la silice sous forme de ferrosilicium), mais sensiblement plus chers, par suite du prix trop élevé de l'oxyde de zirconium (6 NF le kg) préparé par les méthodes classiques (attaque du zircon à la soude).

Parmi les autres produits à base d'oxyde de zirconium, il convient de citer le *zirconate de calcium*  $\text{ZrO}_2\text{Ca}$  obtenu par réaction dans l'air vers 2 000 °C d'un mélange d'oxyde de zirconium et de chaux ou de carbonate de calcium. Ce produit, très sensible aux atmosphères carburantes, peut difficilement être préparé au four électrique.

La production de monocristaux à l'aide des fours de moyennes et de grandes puissances est également

\* Laboratoire de l'énergie solaire du Centre national de la recherche scientifique, Mont-Louis, Pyrénées-Orientales, France.

<sup>1</sup> Pour la description de ces fours, voir plus haut le mémoire S/35, de F. Trombe, M. Foëx et Ch. Henry La Blanchetais.

susceptible de présenter un grand intérêt économique. A titre jusqu'à présent expérimental, nous avons préparé des cristaux assez importants de spinelle de magnésium (4 à 6 cm de côté et de quelques mm à un cm d'épaisseur).

Les produits ainsi préparés présentent la plupart du temps un caractère « original » et diffèrent notablement des produits obtenus au moyen de procédés électrothermiques ou autres. Les traitements se font au four solaire, sans contamination par les parois d'un récipient réfractaire, ni par l'atmosphère; de plus, ils sont souvent accompagnés d'effets de purification beaucoup plus importants que ceux notés au four électrique. Les produits obtenus ne sont pas directement concurrencés par ceux réalisés avec d'autres moyens; ils sont en général plus purs et de meilleure qualité, et peuvent être ainsi vendus plus chers. D'autre part, les rendements réalisés sont déjà notables, et deviendront très importants avec des installations plus puissantes (voir plus loin).

Certains oxydes réfractaires ou mélanges d'oxydes réfractaires fondus sont susceptibles d'être coulés de façon à obtenir des pavés devant servir ensuite d'éléments de construction de parois de fours. Cette méthode pourrait s'appliquer à la mullite ou à certains réfractaires à base d'alumine ou de zircon.

Les fours centrifuges permettent aussi de fabriquer directement des creusets en matières réfractaires. Suivant la densité de chargement, la vitesse de rotation et la durée de traitement, on obtient une capacité de dimension et de forme déterminée qui peut présenter un fond si l'on donne à la cuve une inclinaison convenable.

Ce sont les mélanges en proportions eutectiques qui donnent les meilleurs résultats lors des opérations de coulée ou de préparation de pièces, par suite de l'absence de masses frittées périphériques importantes. Les produits obtenus, bien que fondant à moins haute température, sont encore assez réfractaires pour recevoir d'intéressantes applications. Il en est ainsi, par exemple, des eutectiques formés par la chromite de magnésium avec d'une part la magnésie et d'autre part l'oxyde de chrome. Les produits précédents présentent une composition homogène et se séparent généralement bien, après solidification de la masse de la poudre qui les entoure.

### Traitements des produits non oxygénés

Le traitement de ces produits nécessite en général l'utilisation d'une paroi étanche transparente au rayonnement solaire. Ce problème a été bien résolu dans le cas des fours de petite puissance (2 kW), dont la production est forcément limitée. Le développement de ces traitements est lié à la mise au point de parois de plus grande surface adaptables aux fours plus puissants. Ce problème est relativement simple à résoudre pour les opérations sous la pression ambiante, surtout grâce à l'emploi de matières plastiques; il est beaucoup plus complexe lorsqu'on a à réaliser de hauts vides.

De nombreux produits spéciaux, ayant des propriétés électriques, optiques ou magnétiques spéciales, pourraient être aussi préparés. Leur préparation est délicate, ces substances étant le plus souvent extrêmement sensibles à l'action des impuretés. Il est donc nécessaire d'une part d'éviter toute contamination de la substance par un support, au cours des traitements thermiques généralement indispensables à leur préparation, d'autre part de définir au maximum les écarts de composition qu'ils sont susceptibles de présenter avec la stoechiométrie.

De nombreux sels (fluorures, notamment) ou les produits réfractaires (sulfures, borures, carbures, nitrures, etc.) pourraient aussi être préparés.

L'obtention de ces divers produits avec un haut état de définition physique et chimique (produits purs et monocristallins) présenterait un grand intérêt économique, de tels produits atteignant actuellement des prix fort élevés.

Les mêmes remarques s'appliquent aux opérations métallurgiques. Les métaux peuvent souvent être traités dans des creusets réfractaires divers, directement préparés à l'intérieur de fours centrifuges à partir de produits en poudre. Ces creusets, entrecoués de poudres calorifuges, sont ensuite utilisés directement pour la fusion des métaux.

Cependant, nous avons réalisé certaines opérations métallurgiques en présence d'air, ou simplement en faisant circuler un courant de gaz protecteur dans les fours centrifuges et en protégeant les métaux par des flux de fusion. Nous avons préparé en particulier des aciers à l'aluminium contenant 2 à 10 p. 100 de ce dernier métal, ainsi que des aciers contenant à la fois du chrome et de l'aluminium. Les masses métalliques ainsi obtenues sont assez homogènes, la désoxydation par l'aluminium est excellente, et les aciers ferritiques obtenus sont ensuite durcissables par nitruration.

### Traitements de minerais

Comme dans le cas des produits réfractaires, il est nécessaire de n'utiliser que des méthodes susceptibles de s'adapter au caractère intermittent de la présence du soleil, ces opérations ne devant pas présenter au départ d'inertie importante.

Les techniques mises au point à Mont-Louis éliminent les contaminations par une paroi de matière étrangère, ce qui permet d'éviter l'emploi de réfractaires dont la résistance à la corrosion à haute température est en général si précaire. Enfin, il convient de considérer de préférence les cas où les températures demandées sont élevées et où les produits traités présentent déjà une certaine valeur.

On peut tout d'abord procéder à la fusion ou au frittage de certains minerais (chromites par exemple), afin d'obtenir une masse densifiée utilisable pour la confection de briques réfractaires. Dans d'autres cas, on réalise simultanément la dissociation d'un composé et le frittage ou la fusion (carbonates de calcium et de magnésie, dolomies, sulfates divers).

Le *grillage* de certains minerais relativement chers peut présenter un intérêt. Plus intéressant semble être la fusion oxydante de minerais (oxydes de fer, de manganèse, etc.) afin d'obtenir des produits exempts de soufre ou d'autres impuretés susceptibles de gêner les métallurgies de qualité.

La préparation de *ferro-alliages par réduction* de certains minerais donne des produits de haut prix, faciles à transporter.

Les *traitements par réduction* permettent aussi d'isoler certains oxydes réfractaires. Ainsi la réduction par le carbone permet d'éliminer des minerais silico-magnésiens, l'excès de silice (formation de SiO volatil) et la plus grande partie du fer présent, et d'obtenir de la forstérite  $\text{SiMg}_2\text{O}_4$ . Pour les phosphates ou silicates, l'élimination d'une grande partie de l'anhydride phosphorique ou de la silice et l'obtention de carbures attaquables par l'eau présente aussi parfois un intérêt (minerais phosphatés de terres rares, béryl).

Les attaques de minerais au moyen d'un réactif solide sont en grande partie conditionnées par le point de fusion du mélange. Cette température de fusion ne peut en effet guère être beaucoup dépassée dans les techniques sans creuset. Il s'ensuit que le choix du réactif a une grande importance; on a ainsi intérêt, lors des fusions alcalines, à employer le carbonate de sodium (point de fusion  $850^\circ\text{C}$ ) ou le bioxyde de sodium, producteurs de  $\text{Na}_2\text{O}$ , plutôt que la soude NaOH (point de fusion  $318^\circ\text{C}$ ). On pourra même souvent employer avantageusement de la chaux (point de fusion  $2\ 600^\circ\text{C}$ ), afin de procéder à une fusion alcalino-terreuse. Les attaques de minerais à température plus élevée s'effectuent généralement plus vite, demandent moins de produits, sont plus complètes, tout en permettant d'éviter aussi les contaminations par les parois d'un creuset.

Enfin, on aura naturellement toujours intérêt à réduire le volume et le poids de réactif, tant pour des raisons d'économie que pour diminuer la masse calorifique du produit à chauffer. Il faut signaler que l'attaque interne par un rayonnement convergent permet de réduire les masses thermiques mises en jeu dans une opération déterminée.

De nombreuses attaques par *fusion alcaline* sont réalisables au moyen notamment de carbonate de sodium, dont le prix (0,15 NF le kg) est inférieur à celui de la soude (0,33 NF le kg), généralement utilisée lors des traitements effectués à température relativement basse avec les fours ordinaires. De plus, les quantités de carbonate de sodium nécessaires sont très inférieures aux quantités de soude (de 1,5 à 2 parties de carbonate de sodium pour 1 de zircon ou de béryl, au lieu de 6 à 8 parties de soude par exemple).

Les traitements au four solaire devraient permettre d'abaisser sensiblement le prix de revient de l'oxyde de zirconium, le zircon de départ étant lui-même assez bon marché (0,18 NF le kg en provenance du Sénégal, et 0,23 NF le kg en provenance d'Australie). Le béryl de Madagascar à 11 p. 100 de  $\text{BeO}$  vaut actuellement 1,60 NF le kg.

La fusion alcaline du wolfram est, elle aussi, d'un grand intérêt, ce minerai cher (6,50 NF le kilo pour un minerai à 65 p. 100 de  $\text{WO}_3$ ) pouvant être traité avec 400 g de carbonate de sodium par kilo, sans ou avec très peu d'agents oxydants (nitrates notamment), la fusion en présence d'air permettant d'éviter la formation de quantités importantes de tungstates ferreux insolubles dans l'eau. A titre indicatif, notons que l'attaque par la lessive de soude en autoclave habituellement utilisée revient à près de 4 NF le kilo, frais généraux compris.

Les *attaques de minerais par les oxydes alcalino-terreux*, par la chaux en particulier, nous ont donné d'excellents résultats; les fusions à température relativement élevées sont rapides et les attaques totales. Ces attaques présentent l'inconvénient de nécessiter une reprise aux acides; mais cela a peu d'importance si le minerai de départ est cher, comme le béryl par exemple (attaqué par moins de son poids de chaux). Dans ce cas, d'excellents résultats sont aussi obtenus avec des mélanges de chaux et de carbonate de sodium, une grande partie de la silice étant alors éliminée par lavage à l'eau.

Les traitements par les *agents chlorurants* s'effectuent généralement à trop basse température pour présenter un intérêt dans le cas des fours solaires. Par contre, d'autres opérations comme celles provoquées par la *vapeur d'eau* à haute température permettent de réaliser d'intéressantes réactions chimiques, la destruction des complexes apatiques qui limitent les possibilités d'emplois des phosphates naturels comme engrais.

### Prévision des résultats susceptibles d'être obtenus avec des fours de grande puissance

Une étude des essais de prévision des résultats susceptibles d'être obtenus avec un four solaire de grande puissance a déjà été effectuée précédemment par les auteurs (4). On donnera ici les principaux résultats de cette étude.

Il a tout d'abord été possible, au Laboratoire de l'énergie solaire de Mont-Louis, de comparer expérimentalement, au cours de près de dix ans d'essais, les rendements de petits fours de laboratoire (2 kW) avec ceux d'un four plus puissant (50 kW) et de montrer que certaines méthodes de traitement convenaient mieux à l'un qu'à l'autre de ces appareils. Par ailleurs, nous avons essayé de prévoir, dans une certaine mesure, les performances susceptibles d'être réalisées par le four solaire de 1 000 kW actuellement en cours de construction à Odeillo, près de Mont-Louis. Notons tout d'abord que les températures atteintes, lors d'une opération déterminée, augmentent généralement peu ou pas lorsque la puissance du four utilisé augmente, toutes choses restant égales par ailleurs.

Les températures maximums susceptibles d'être réalisées dépendent en effet essentiellement de l'éclairage énergétique susceptible d'être obtenu sur le plan focal (1 kW/cm<sup>2</sup> par exemple). Cet éclairage

énergétique dépend des caractéristiques optiques des appareils (ouverture, qualité des miroirs, etc.), mais non de leurs dimensions.

On note cependant l'importance à ce sujet de la perfection optique des miroirs paraboliques permettant de concentrer l'énergie. Un petit miroir de 2 mètres de diamètre équipant un petit four de laboratoire pourra être de haute qualité, à condition d'y mettre le prix. Il sera nécessaire, pour arriver au même résultat par la technique des glaces déformées (5, 6) de réaliser de très grands fours, comme celui d'Odeillo (1 000 kW), qui donnera vraisemblablement des éclaircissements énergétiques au foyer très supérieur à celui du four de Mont-Louis (50 kW), fonctionnant suivant le même principe. Notons aussi que les températures maximums susceptibles d'être atteintes augmentent d'environ 20 p. 100 lorsque la concentration d'énergie double.

Dans beaucoup de traitements au four solaire, la température est limitée par la fusion des substances traitées, la masse support sous-jacente étant constituée par la substance elle-même. Une surchauffe importante des masses fondues est aussi rendue difficile, dans la plupart des cas, par les effets de volatilisation.

Le rendement des opérations effectuées est également peu affecté par la puissance des fours lorsqu'il s'agit de traitements de substances soumises directement à l'action du rayonnement : produits placés directement dans le plan focal, au point fixe ou avec déplacement.

Les rendements augmentent par contre beaucoup pour toutes les techniques dans lesquelles le rayonnement n'est pas admis directement sur la surface de la substance à traiter, mais bien dans une cavité présentant un orifice placé au foyer de l'appareil, cette cavité pouvant être constituée par une matière différente de la substance traitée ou par cette substance elle-même.

Dans toutes ces applications en cavité, l'orifice doit avoir une section suffisante pour laisser pénétrer le rayonnement dans l'enceinte. Cet orifice ouvre ainsi une surface 20 fois plus grande pour une installation de 1 000 kW que pour une installation de 50 kW, l'augmentation de diamètre étant de  $20^{1/2} = 4,5$ .

Deux cas sont à considérer. Tout d'abord celui où la surface interne des fours est proportionnelle à la puissance des installations. Le volume est alors proportionnel à  $P^{3/2}$  (facteur 90 lors du passage 50 kW-1 000 kW). Si l'épaisseur du calorifuge est la même dans les deux cas, la température maximum susceptible d'être atteinte est identique, les pertes d'énergie par rayonnement à travers l'orifice et par conductibilité thermique à travers les parois augmentant dans le rapport  $P$ .

Si, après avoir porté le four à une température déterminée, on y effectue la fusion d'une substance ou un traitement thermique quelconque, les rendements obtenus seront les mêmes quelle que soit la puissance du four. La quantité de matière susceptible d'être contenue dans les fours étant proportionnelle

à  $P^{3/2}$ , le temps nécessaire à la fusion d'une charge complète sera par contre beaucoup plus grand avec un grand qu'avec un petit four (4,5 fois plus pour 1 000 kW que pour 50 kW), et cette fusion ne pourra pas toujours être réalisée dans le cadre d'une journée d'ensoleillement.

Un autre cas est celui où le volume des fours est proportionnel à la puissance  $P$  des installations. La surface interne n'augmente alors que de  $P^{2/3}$  (soit de 7,4 fois lors du passage 50 kW-1 000 kW). Dans ces conditions, les pertes par conductibilité thermique sont proportionnellement moins importantes avec le grand four, et il sera ainsi possible d'obtenir des températures beaucoup plus élevées, même si l'épaisseur du calorifuge du grand four n'est pas supérieure à celle du petit four.

Si, au lieu de chercher à obtenir une température plus élevée avec le grand four, on procède à un traitement à la même température dans les deux cas, on obtiendra des rendements plus considérables avec le grand four qu'avec le petit. L'augmentation est très marquée lorsque la température d'utilisation n'est pas trop élevée, les pertes de chaleur s'effectuant essentiellement par conductibilité thermique à travers les parois réfractaires. Elle est par contre plus faible à très haute température (au-dessus de 2 500 °C par exemple), les pertes par rayonnement à travers l'orifice (proportionnelles à la puissance des fours) l'emportant sur les pertes par convection et conductibilité. On a ainsi évalué la vitesse de fusion du fer à 1 kg par kWh pour un four fonctionnant avec l'installation de 50 kW et à 2 kg par kWh dans le cas de l'appareil de 1 000 kW.

En se basant sur des conditions analogues aux précédentes, on peut faire un pronostic sur les résultats susceptibles d'être obtenus avec un type de four particulièrement important dans le cas des installations solaires; il s'agit des fours centrifuges (voir plus haut le mémoire S/52).

Les fours centrifuges, lorsqu'ils sont utilisés pour la fusion de produits à conductibilité thermique relativement faible (oxydes réfractaires en particulier), permettent d'effectuer des opérations à température sensiblement constante, mais à volume variable, puisque la cavité formée s'agrandit au fur et à mesure que la fusion progresse au sein de la poudre qui remplit initialement la cuve métallique. Le produit fondu est à une température sensiblement uniforme et peu supérieure à celle du point de fusion de la substance traitée, la conductibilité thermique de la masse fondue étant beaucoup plus importante que celle du produit en poudre qui l'entoure; de plus, les échanges par convection dans la masse fondue tendent aussi à homogénéiser la température.

Les pertes calorifiques se font d'abord par rayonnement à travers l'orifice du four. Ces pertes sont constantes, pour une opération et une installation données; elles sont en outre proportionnelles à la puissance de l'installation. D'autres pertes, généralement les plus importantes, ont lieu par conductibilité thermique à travers le produit en poudre entourant le produit fondu; elles sont essentiellement condi-

tionnées par l'étendue, de la surface de contact produit fondu, produit en poudre, ainsi que par l'épaisseur, de la masse de poudre.

Nous allons comparer pour commencer les résultats expérimentaux (figure 1) obtenus dans les installations de 2 et 50 kW pour la fusion d'alumine en poudre, de densité apparente voisine de 1. On a noté la masse d'alumine fondue par unité de puissance (kilo par kilowatt installé) en fonction du temps; les pentes de ces courbes donnent les vitesses de fusion à chaque instant.

On note tout d'abord, et pendant un temps très court, une vitesse de fusion faible mais analogue dans les deux cas. Le produit se trouve dans le plan focal, ou près de ce plan, et met un instant pour s'échauffer avant de fondre. Le produit se cavite, et le rayonnement admis à travers l'orifice se répartit sur la surface intérieure de la cavité formée, où il est absorbé presque totalement. On note la formation d'un front de fusion à la limite du produit fondu et de la poudre. Ce front de fusion se déplace progressivement vers le fond et la périphérie de la cuve.

Ensuite, le rendement augmente et passe par un maximum. Ce phénomène a lieu un peu plus tôt avec l'installation de 2 kW qu'avec celle de 50 kW, la cavitation se produisant plus rapidement dans le premier cas. La masse fondue croît en effet au début

comme la puissance  $P$ ; la profondeur de la cavitation est alors du même ordre dans les deux cas, et la profondeur relative est plus grande pour le petit four, qui captera plus d'énergie par réflexions successives.

Très rapidement ensuite, le rendement de l'installation de 50 kW dépasse considérablement celui de l'installation de 2 kW, la vitesse de fusion diminuant très vite (après un quart d'heure) avec le petit four, alors qu'elle reste très importante pendant longtemps (2 heures environ) avec le four de 50 kW.

Cela s'explique aisément si l'on considère que la fusion d'une quantité de produit proportionnelle à la puissance  $P$  de l'installation provoque la formation d'un front de fusion de surface proportionnelle seulement à  $P^{2,3}$  (soit à 8,5 dans le passage 2-50 kW). L'énergie reçue par unité de surface du front de fusion est dans ces conditions plus importante avec la grande installation qu'avec la petite (2,9 fois plus importante lorsqu'on passe de 2 à 50 kW). Il en résultera alors une plus grande vitesse de fusion pour la grande installation.

Les vitesses de fusion tendront à devenir du même ordre au moment où les surfaces de front de fusion obtenues seront proportionnelles à la puissance  $P$ , le volume et le poids de produit fondu étant alors proportionnels à  $P^{3,2}$ . On aura alors fondu environ 5 fois plus de matière par kWh avec l'installation de 50 kW qu'avec celle de 2 kW.

Nous avons, dans le cas de l'alumine (point de fusion : 2 050 °C), tracé la courbe « énergie reçue par unité de surface du front de fusion » (en watts/cm<sup>2</sup>) en fonction de la « masse fondue par unité de puissance » (kg par kW installé) (figure 2), la profondeur des cavités étant supposée égale à leur diamètre : 1) pour un four de 50 kW; 2) pour un four de 1 000 kW.

Afin de comparer les résultats susceptibles d'être obtenus avec des installations de puissance différente, nous avons considéré des fours centrifuges présentant des cuves dont la surface interne est proportionnelle à la puissance  $P$  de l'installation (et non pas des cuves de volume proportionnel à  $P$ ). Il s'ensuit que les cuves de 25 et 70 litres du four de 50 kW ont été comparées à des cuves 90 fois plus grandes, de 2 250 à 6 000 litres dans le cas du four de 1 000 kW.

Les résultats expérimentaux obtenus avec un four de 50 kW indiquent que les quantités de produit obtenues, dans le cadre d'une journée, sont indépendantes de la capacité des cuves au-dessus de 70 litres. On a tenu compte des épaisseurs d'alumine calorifuges non fondues pour le calcul des limites approximatives de fusion.

Avec le four de 50 kW et une cuve de 25 litres contenant environ 25 kg de produit, l'opération est pratiquement terminée après 2 heures de traitement (18 kg de produit). Avec une cuve de 70 litres et 70 kg d'alumine, la fusion s'arrête d'elle-même sous le rayonnement, après environ 3 heures de traitement; l'énergie reçue par unité de surface du front de fusion devenant trop faible, l'opération ne progresse plus.

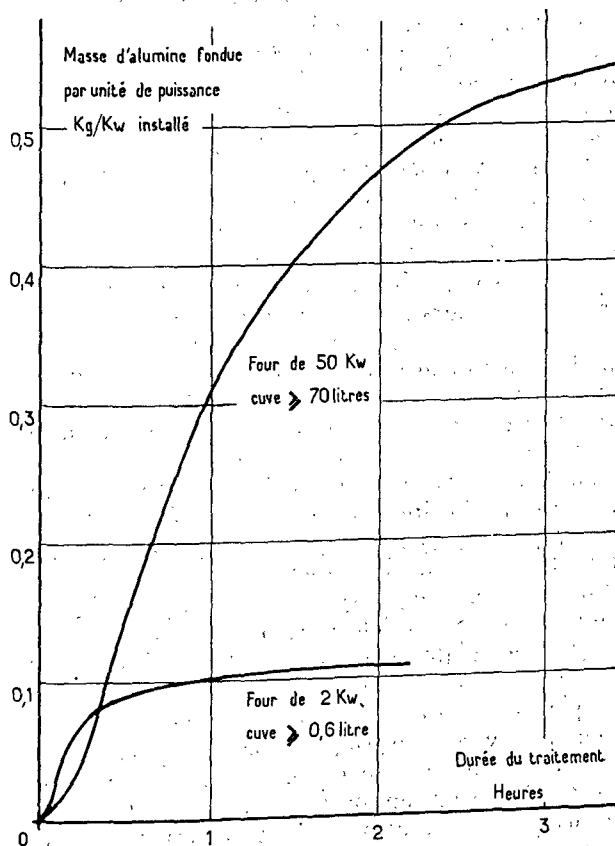


Figure 1. Comparaison des résultats obtenus pour la fusion de l'alumine avec des fours centrifuges fonctionnant avec des installations de 2 kW et 50 kW, respectivement

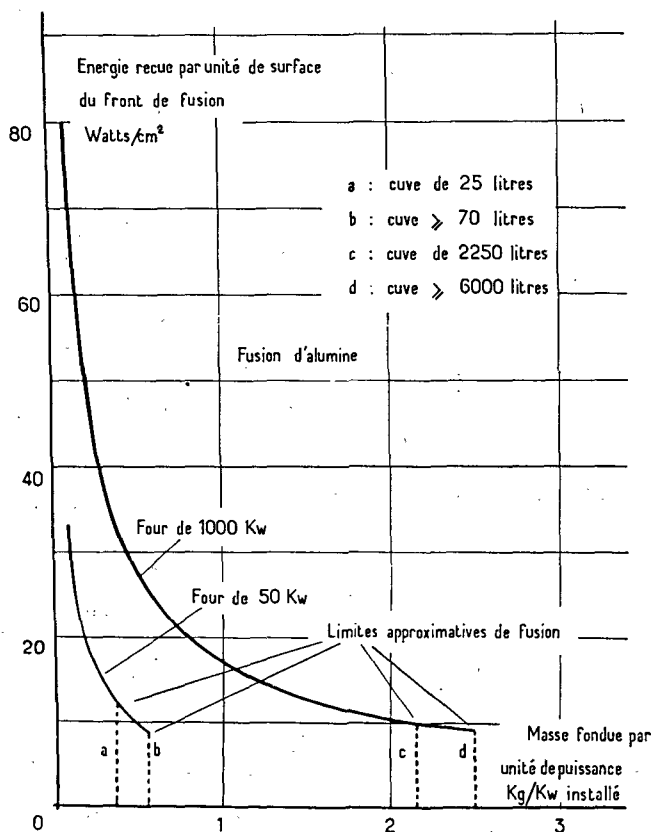


Figure 2. Courbes relatives à la fusion de l'alumine à l'aide de fours centrifuges solaires d'une puissance de 50 kW et 1 000 kW. Ces courbes donnent l'énergie reçue par unité de surface du « front de fusion » (watts/cm<sup>2</sup>) en fonction de la masse fondue par unité de puissance (kg par kW installé)

Une cuve plus grande que 70 litres donne des résultats semblables.

D'après les considérations précédentes sur l'énergie reçue par unité de surface du front de fusion, le four de 1 000 kW devrait donner, avec une cuve de dimensions suffisantes (6 000 litres) chargée de 6 000 kg de produit, des masses de l'ordre de 2 tonnes après huit heures de traitement. Pratiquement, et contrairement à ce qui se passe avec l'installation de 50 kW, l'opération ne devrait pas être terminée à ce moment-là; autrement dit, un ensoleillement plus prolongé permettrait d'obtenir une masse plus importante de produit fondu.

Les rendements maximums des opérations, voisins avec les installations de 2 et 50 kW, ne devraient pas être très différents avec les fours de 50 kW et 1 000 kW. Par contre, le rendement moyen est beaucoup plus important dans ce dernier cas : par exemple 2 fois pour 2 heures 1/2, 4 fois pour 5 heures. Il est à noter qu'en procédant dans le cas de l'installation de 50 kW à des changements de fours fréquents (par exemple 8 fois par jour) il serait possible d'atténuer cette différence.

Les produits fondus au four centrifuge de 50 kW s'entourent d'une croûte de produit fritté au moment

où la fusion s'arrête de progresser rapidement. On peut espérer réduire beaucoup ce phénomène avec les installations de 1 000 kW, la vitesse de fusion avec une cuve de capacité suffisante devant être encore considérable en fin de journée de travail.

Certaines des considérations précédentes s'appliquent au frittage des produits dans les fours centrifuges. On peut en effet provoquer le frittage et éviter la fusion, soit en diminuant l'énergie admise dans le four, soit en chargeant moins la cuve de façon à augmenter le volume initial de la capacité. La masse cohérente de produits frittés est meilleure conductrice de la chaleur que le produit en poudre périphérique. Cependant, contrairement à ce qui se passe lors des fusions, la température du produit traité n'est pas homogène, et de plus cette température diminue en cours d'opération au fur et à mesure que la masse frittée augmente.

Les considérations précédentes permettent de faire un pronostic favorable en ce qui concerne le rendement des fours solaires de grande puissance, et en particulier du four de 1 000 kW actuellement en construction près de Mont-Louis.

Les quantités d'oxydes réfractaires fondus ou frittés avec une installation de 1 000 kW devraient atteindre au moins 2 ou 3 tonnes par jour, soit environ 1 000 tonnes par an pour un four travaillant dans une région très ensoleillée. Nous avons estimé (4) à 1 NF le kg le prix de revient de la fusion du réfractaire « moyen » pour le four solaire, tel que l'oxyde de zirconium, le zirconate de calcium ou le corindon pur, en tenant compte de l'amortissement de l'installation, de son fonctionnement et des charges de l'entreprise.

Des installations plus puissantes encore que celles de 1 000 kW, par exemple une installation de 20 000 kW, permettrait encore d'améliorer le rendement des opérations. Ainsi, la fusion du fer dans un four à cavité, qui s'effectue avec un rendement de 30 p. 100 environ dans le cas du fer, passerait d'après le calcul à 60 ou 70 p. 100 environ avec un four de 1 000 kW et à un peu plus de 80 p. 100 pour une installation de 20 000 kW. Par contre, la construction de fours de 20 000 kW reviendrait probablement plus cher par kW installé que celle de fours de 1 000 kW, la construction du paraboloïde et de son support augmentant dans de plus larges proportions que la puissance de l'installation.

Il semble donc que les fours de puissance moyenne, de l'ordre de 1 000 kW à 3 000 kW, seront ceux qui présenteront le maximum de rentabilité, les rendements obtenus étant déjà élevés et la construction relativement peu coûteuse.

## Conclusions

Notons que les fours solaires ne pourraient être efficacement utilisés pour la production d'énergie mécanique ou électrique que si le prix de revient du système orienteur pouvait être suffisamment abaissé, le paraboloïde étant alors construit d'une

manière tout à fait différente et plus économique que pour la production des hautes températures. L'énergie électrique obtenue ne pourrait guère dépasser 20 p. 100 de l'énergie thermique réellement concentrée. On ne peut donc envisager pour l'instant de construire des centrales solaires concurrentes des centrales classiques, même dans les zones arides très ensoleillées. Par contre, il n'est pas déraisonnable de concevoir la création d'usines solaires comportant un ou plusieurs fours d'une puissance de l'ordre de 1 000 kW, spécialisées dans le domaine des oxydes et composés réfractaires (fusion, frittages, purifications, réactions chimiques, etc.) ou dans les traitements de minerais.

Un grand nombre de ces opérations s'effectuent sans inertie thermique notable et peuvent être arrêtées à un moment quelconque de la journée, ce qui est important étant donné la durée limitée du travail au moyen de fours solaires (8 heures en moyenne par jour).

Ce type d'usine pourrait être installé dans des régions à bon ensoleillement, à proximité si possible de moyens de communications suffisants permettant des liaisons faciles avec des centres industriels. On pourrait, dans certains cas, opter pour des régions à ensoleillement un peu moins considérable mais actuellement moins isolées que certaines régions désertiques à ciel toujours clair. Enfin, chaque fois que la chose est possible, il vaudra mieux s'installer à une certaine altitude afin d'avoir un rayonnement solaire plus intense.

Le cas du traitement des minerais est quelque peu différent de celui des produits déjà manufacturés. Il est bien souvent intéressant de les traiter sur place, même si l'on est éloigné des régions industrielles, à condition toutefois de disposer d'un soleil suffisant, ce qui serait le cas de nombreuses régions arides sous-développées, et des régions sahariennes en particulier. Les produits traités sont en général moins lourds et donc moins onéreux à transporter que les minerais bruts.

Pour les minerais, les traitements à température très élevée (production de produits réfractaires, élimination de certaines impuretés) ne sont pas du reste les seuls intéressants. On peut concevoir l'intervention de fours solaires pour des opérations à température moyenne (grillages par exemple),

l'absence dans ces régions d'autres moyens bon marché de chauffage pouvant justifier ces opérations.

Le grand four actuellement en construction à Odeillo doit, d'une part, servir à la recherche fondamentale et appliquée et, d'autre part, être utilisé pour des essais d'ordre industriel, et même pour certaines fabrications.

Parmi les recherches prévues, il convient de citer en premier lieu la préparation de produits bien définis tels que l'exige le développement de la physique et de la chimie modernes. Ces produits doivent être en général monocristallins et présenter une grande pureté, ou plus exactement être sensiblement exempts de certaines impuretés, ou contenir en addition des quantités bien déterminées, généralement très faibles, de certains produits. Les différents procédés de purification mis au point au Laboratoire de l'énergie solaire de Mont-Louis sont aisément transposables à une plus grande échelle. D'autre part, les grandes masses fondues données par les installations de grande puissance permettent de préparer par refroidissement lent des quantités importantes de monocristaux à la fois purs et sensiblement exempts de tensions mécaniques.

Les quantités de matières engagées dans les opérations réalisées avec le four de 1 000 kW allant de quelques centaines de kilos à quelques tonnes, il ne sera pas possible d'effectuer continuellement des travaux d'ordre scientifique, surtout lorsque les produits utilisés sont chers. De nombreuses opérations à caractère industriel devront être envisagées dans l'intervalle. Il s'agit en premier lieu du frittage ou de la fusion des oxydes réfractaires pour lesquels un début de marché a été créé à Mont-Louis. Le grand four doit vraisemblablement permettre de préparer la matière première destinée après rebroyage à fabriquer des pièces réfractaires importantes, et en particulier des briques spéciales utilisables dans d'autres types de fours fonctionnant à hautes températures.

Il semble aussi que l'on doive envisager le développement des mises au point relatives aux traitements de minerais susceptibles d'être traités sur place dans les régions arides et ensoleillées.

Le four solaire d'Odeillo doit servir en quelque sorte d'usine pilote et encourager la création de grands fours solaires à caractère purement industriel.

## Références

1. Trombe, F. et Foëx, M., *Traitement des oxydes réfractaires et composés réfractaires non métalliques*, Colloque sur l'énergie solaire, CNRS, Mont-Louis, 1958.
2. Trombe, F. et Foëx, M., *Quelques aspects de la métallurgie au four solaire*, Colloque sur l'énergie solaire, CNRS, Mont-Louis, 1958.
3. Foëx, M., *Attaques de divers minerais au four solaire*, Colloque sur l'énergie solaire, CNRS, Mont-Louis, 1958.
4. Trombe, F. et Foëx, M., *Remarques sur les résultats susceptibles d'être obtenus avec un four solaire de grande puissance*, Colloque sur l'énergie solaire, CNRS, Mont-Louis, 1958.
5. Trombe, F., *High Temperature Furnaces*, *Proceedings of the World Symposium on Applied Solar Energy*, Phoenix (Arizona), 1955.
6. Trombe, F., *Les installations de Mont-Louis et le four solaire de 1 000 kW d'Odeillo-Font-Romeu*, Colloque sur l'énergie solaire, CNRS, Mont-Louis, 1958.

### Résumé

Les auteurs examinent tout d'abord les principaux types de traitements susceptibles de recevoir, ou ayant déjà reçu, des applications pratiques, avec des fours de petites et moyennes puissances (2 kW et 50 kW).

Les opérations les plus simples qu'il soit possible de réaliser avec les fours solaires sont les traitements en milieu oxydant, dans l'air ambiant. C'est précisément l'opération la plus difficile à effectuer avec d'autres moyens de chauffage, avec les fours électriques en particulier, surtout lorsque la température dépasse 2 000 °C.

Les opérations en milieu oxydant conviennent en particulier fort bien au traitement de nombreux produits à base d'oxydes réfractaires. Ces traitements ont reçu un début d'application pratique au Laboratoire de l'énergie solaire de Mont-Louis, qui a ainsi fondu ou fritté une dizaine de tonnes d'oxydes réfractaires depuis quelques années. La plus grande partie de ces produits ont servi à la confection de pièces céramiques diverses. Parmi les oxydes traités, on doit citer le corindon, le spinelle de magnésium, l'oxyde de zirconium et le zirconate de calcium. L'oxyde de zirconium présente une importance particulière par suite de sa réfractarité et de l'abondance relative de ses minerais.

Certains produits réfractaires peuvent être obtenus à l'état pur, et parfois à l'état monocristallin.

Le traitement des produits non oxygénés nécessite en général l'utilisation d'une paroi étanche transparente au rayonnement solaire. Ce problème a été bien résolu dans le cas des fours de petite puissance. De nombreux produits ayant des propriétés électriques, optiques ou magnétiques spéciales peuvent ainsi être obtenus en atmosphère rigoureusement contrôlée, avec un haut état de définition physique et chimique.

Divers minerais sont susceptibles d'être traités au four solaire. Comme dans le cas des produits réfractaires, seules les méthodes susceptibles de s'adapter au caractère intermittent de la présence du soleil doivent être retenues, les opérations ne devant pas présenter au départ d'inertie importante. Les techniques mises au point à Mont-Louis éliminent le problème des parois réfractaires, dont la résistance à la corrosion est en général si précaire à haute température.

Parmi les traitements de minerais envisagés, on peut citer : les opérations de fusion; de dissociation, de grillage, de réduction, les traitements par réactifs divers (fusion alcaline ou alcalino-terreuse, action des agents chlorurants, etc.).

Les minerais assez abondants pour permettre des opérations en demi-grand, ou même en grand, et d'un prix suffisant pour assurer une rentabilité convenable des installations sont les plus intéressants.

On pourra ainsi obtenir de l'oxyde de zirconium par fusion alcaline du zircon, de l'oxyde de béryllium

par traitement du béryl, de l'anhydride tungstique par fusion alcaline du wolfram, ou encore des ferro-alliages au moyen de traitements réducteurs.

Les auteurs examinent ensuite les résultats susceptibles d'être obtenus avec un four solaire de grande puissance (1 000 kw) en se basant, en particulier, sur les résultats expérimentaux obtenus au cours de 10 ans d'essais avec des petits fours (2 kW) de laboratoire et avec un four de moyenne puissance (50 kW).

Les températures atteintes, lors d'une opération déterminée, augmentent généralement peu lorsque la puissance du four utilisé augmente, toutes choses restant égales par ailleurs, en particulier lorsque les éclaircissements énergétiques réalisés sur le plan focal restent les mêmes.

Si le rendement des opérations est peu affecté par la puissance des fours lorsqu'il s'agit de traitements de substances soumises superficiellement à l'action du rayonnement, il n'en est pas de même lorsque le rayonnement est admis dans une cavité présentant un orifice placé au foyer de l'appareil, cette cavité pouvant être constituée par une matière différente de la substance traitée ou par la matière traitée elle-même.

Dans tous les cas où la surface interne des cavités est proportionnelle à la puissance des installations, les pertes par conductibilité thermique à travers les parois sont proportionnellement moindres avec le grand qu'avec le petit four. Il est ainsi possible d'obtenir avec un four de grandes dimensions des températures plus élevées, ou encore des rendements de traitement plus élevés pour une température égale.

Un cas particulièrement intéressant est celui des fours centrifuges. Il s'agit de capacités permettant d'effectuer des fusions de produits réfractaires à température sensiblement constante, mais avec des volumes variables; la cavité formée s'agrandit au fur et à mesure que la fusion progresse au sein de la poudre qui remplit initialement la capacité.

Considérons deux fours centrifuges fonctionnant avec des installations de puissances très différentes, la surface interne des cavités et la surface de leur orifice d'accès du rayonnement étant proportionnelles à la puissance de l'installation. Les pertes calorifiques s'effectuent tout d'abord par rayonnement à travers l'orifice; ces pertes sont sensiblement constantes au cours du temps, la fusion se poursuivant à une température déterminée; elles sont par ailleurs proportionnelles à la surface de l'orifice des capacités chauffées, et par conséquent à la puissance de l'installation.

Pour une quantité déterminée de produit fondu par unité de puissance de l'installation, les pertes d'énergie par conductibilité thermique à travers la poudre de produit non fondu sont proportionnellement plus faibles avec un grand four qu'avec un petit four. Il s'ensuit que les rendements des fusions



effectuées avec les grandes installations sont plus considérables.

Les quantités d'oxydes réfractaires fondues ou frittées avec une installation de 1 000 kW devraient atteindre 2 ou 3 tonnes par jour, soit 2 ou 3 kg par kW et par jour, alors qu'une installation de 50 kW ne produit guère plus de 1 kg par kW et par jour, soit un rendement deux ou trois fois plus faible.

Une installation de 1 000 kW placée dans une zone très ensoleillée devrait produire ainsi 1 000 tonnes par an de produits réfractaires. Les fours beaucoup

plus puissants encore (10 000 ou 20 000 kW) n'auraient pas des rendements beaucoup plus élevés et seraient relativement plus coûteux, la construction du paraboloïde et de son support augmentant dans de plus larges proportions que la puissance de l'installation.

Le four solaire de 1 000 kW actuellement en construction à Odeillo devrait servir non seulement pour la recherche scientifique, mais également comme usine pilote, afin d'encourager la création de grands fours solaires à caractère purement industriel.

## PRACTICAL APPLICATIONS OF SOLAR FURNACES TODAY AND ECONOMIC POSSIBILITIES OF THEIR DEVELOPMENT

### Summary

The authors first examine the principal types of treatment that can be practically applied, or have already been so applied, with low and medium power solar furnaces (2 kW and 50 kW).

The simplest operations that can be performed with solar furnaces are treatments in an oxidizing medium, including the atmosphere. This is precisely the most difficult type of operation when other methods of heating are used, particularly electric furnaces, and above all at temperatures over 2000°C.

Operations in an oxidizing atmosphere are especially suitable for treating many products with a refractory oxide base. These treatments were first applied practically at the Mont-Louis Laboratory of Solar Energy, and some ten metric tons of refractory oxides have been melted or fritted there during the last few years. For the most part, these products have been used in the manufacture of various ceramics. The oxides so treated have included corundum, magnesium spinel, zirconia, calcium zirconate, etc. Zirconia is particularly important on account of its refractory properties and the relative abundance of its minerals.

Certain refractory products may be produced in the pure state, sometimes in the monocrystalline state.

The treatment of oxygen-free products requires, as a rule, the use of a gas-impermeable wall transparent to solar radiation. This problem has been satisfactorily solved for low-power furnaces. Numerous products with special electrical, optical or magnetic properties may be prepared in this way in a rigidly controlled atmosphere, and have highly definite physical and chemical properties.

Various minerals can be treated in the solar furnace. As in the case of refractories, only methods adaptable to the intermittent availability of sunshine should be applied, since the operations must not have a great inertia at the onset. The techniques developed at Mont-Louis eliminate the problem of refractory walls, whose high-temperature resistance to corrosion is in general so precarious.

Among the treatments of minerals, we may mention melting, decomposition, roasting, reduction, and treatment with various reagents (fusion with alkalis or alkaline earths, action of chloridizing agents, etc.).

Minerals abundant enough for semi-industrial or even large-scale operations, which are priced high enough to ensure an adequate return on investment, are of the greatest interest.

In this way zirconia may be produced by alkaline fusion of zircon, beryllium oxide by similar treatment of beryl, tungstic anhydride by such fusion of wolframite, or various ferro alloys by reducing treatment.

The authors next discuss the results obtainable from a high-power solar furnace (1 000 kW), based particularly on the experimental results of ten years work with small laboratory furnaces (2 kW) and with one medium-power furnace (50 kW).

The temperatures attained in a given operation generally increase only slightly with increasing power of the furnace, other things being equal, especially when the irradiancy on the focal plane remains the same.

While the efficiency of an operation is little affected by the power of the furnace in the case of substances subjected only superficially to the action of radiation, the situation is different when the radiation is admitted into a cavity with its opening in the focal plane of the furnace. This cavity may be in a material other than the treated substance, or it may be in that substance itself.

In all cases where the internal surface of the cavity is proportional to the power of the furnace, the heat losses by conduction through the walls are proportionately less with a large furnace than with a small one. Thus higher temperatures, or higher treatment yields at the same temperature, may be obtained with a large furnace.

Centrifugal furnaces are of particular interest. Their capacity permits fusion of refractories at

substantially constant temperatures, but in varying volumes; the cavity formed becomes larger as the fusion progresses in the powder which initially takes up the entire volume.

The authors consider two centrifugal furnaces operated by very different power plants. The internal surface of the cavities and the surface of the opening admitting the radiation being proportional to the power of the plant, the heat losses take place at first by radiation through the opening. These losses are substantially constant with time, melting occurring at a definite temperature. They are also proportional to the surface area of the opening of the space being heated, and, consequently, also to the power of the installation.

For a given quantity of product melted per unit power of the installation, the energy losses by thermal conductivity through the unmelted powdered product are proportionally smaller with a large furnace than with a small one. The yield of a melting operation

with a large furnace is consequently higher than with a small one.

The quantities of refractory oxides melted or fritted with a 1 000 kW furnace should amount to 2 to 3 metric tons a day, or 2-3 kg/kW/day, while a 50 kW furnace yields no more than 1 kg/kW/day, which is only half or a third as great.

A 1 000 kW furnace installed in a region of high insolation should thus produce 1 000 tons of refractory products a year. Much more powerful furnaces (10 000 or 20 000 kW) would not give much higher yields, and would be relatively more costly, since the construction costs of the paraboloid and its mounting increase more rapidly than the power of the furnace.

The 1 000 kW solar furnace now under construction at Odeillo is to be used not only for scientific research, but also as a pilot plant with the object of encouraging the construction of large solar furnaces for purely industrial purposes.

## OBTENTION DE CARBURE DE BORE ET TRAITEMENT THERMIQUE DE MINÉRAUX AU FOUR SOLAIRE

Guy Vuillard \*

Le but de nos travaux est de trouver une utilisation des hautes températures réalisables au four solaire pour des transformations chimiques présentant quelques analogies avec nos recherches fondamentales.

Les miroirs paraboliques dont nous disposons reçoivent directement le rayonnement solaire. Comme il n'était pas question, à ce stade de nos travaux, de faire construire un jeu de miroirs envoyant le faisceau de rayons concentrés vers le sol, tous nos fours fonctionnent avec leur ouverture tournée vers le bas.

### Préparation du carbure de bore

#### Réaction utilisée

Cette réaction peut se schématiser par l'équation :



où l'on admet que le bore fondu (à partir de 2 300°) dissout le carbone (graphite) et réagit pour former des grains de carbure de bore réfractaire.

Le bore étant particulièrement oxydable, la réaction doit se passer à l'abri de l'air. Le principe des opérations est alors le suivant : un mélange de bore et de graphite dans la proportion  $B_4C$  est comprimé en pastilles cylindriques de 10 mm de hauteur environ. Une pastille enchâssée dans un creuset de graphite de même diamètre est portée dans le vide à une température qui atteint 2 500 °C au moins en 10 minutes environ. La pastille stratifiée par le traitement contient une couche de carbure de bore représentant 10 à 20 p. 100 du cylindre initial.

#### Description des fours à vide

Le premier dispositif utilisé est enfermé dans un ballon en verre Pyrex de 2 litres. Le bouchon en caoutchouc laisse passer un tube en laiton de 24 mm qui sert à la fois de canalisation pour le vide et de support pour le creuset (figure 1). Le vide maintenu par une pompe à palettes à deux étages est de  $10^{-2}$  mm de mercure. Le centrage du trou d'entrée dans le couvercle du creuset sur l'image du soleil est obtenu en déplaçant le ballon. Il est facile de suivre le soleil

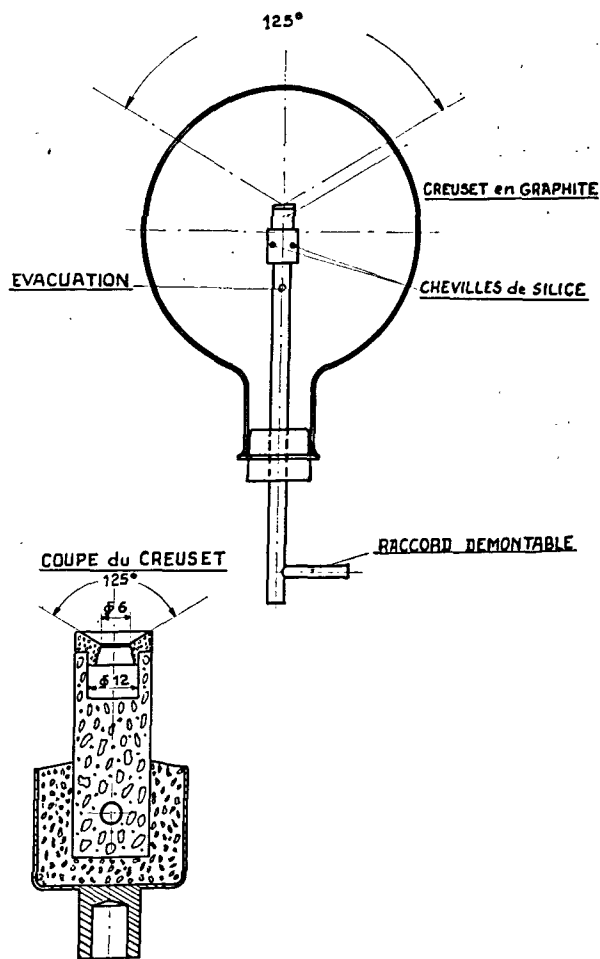


Figure 1

pendant 20 minutes en manœuvrant à la main les volants de pointage du projecteur.

Un deuxième four à vide utilisé paraît susceptible d'extrapolation plus facile. Le creuset de graphite est analogue au précédent, mais il est suspendu par trois pointes mousses suivant l'axe d'un cylindre métallique de 15 cm de diamètre, refroidi par une circulation d'eau. Le rayonnement est introduit par une coupole hémisphérique de silice fondue calculée pour laisser pénétrer jusqu'au foyer un cône de rayons lumineux de 120° (figure 2).

\* Professeur à la Faculté des Sciences d'Alger, Directeur de recherches à l'Institut de l'énergie solaire de l'Université d'Alger, Algérie.

### Résultats obtenus avec le carbure de bore

Les produits obtenus se présentent en grains de 0,1 mm au maximum. La couche riche en carbure de bore est d'aspect plus grenu et plus brillant que le reste. On fait subir à cette partie du mélange un traitement de plusieurs heures dans l'acide nitrique fumant à l'ébullition. Le bore et le carbone sont éliminés. Les grains de carbure de bore, après lavage et séchage, sont observés à la loupe. Leur aspect brillant et compact permet de les distinguer. Leur extrême dureté est mise facilement en évidence en rayant un cristal de corindon.

Il faut remarquer qu'une importante fraction du mélange réactionnel est volatilisée et vient se condenser sur les parties froides de l'appareil. Des recherches sont en cours pour récupérer les produits sublimés et les caractériser.

### Traitement du béryl en vue de la séparation du béryllium

Une deuxième application a été suggérée par la découverte de mines de béryl pierreux sur notre territoire. Il s'agit de traiter le minerai, si possible

près du lieu d'extraction, en zone aride, pour en retirer un composé simple du béryllium, l'oxyde par exemple.

Le béryl est inattaquable par les acides, mais on sait qu'après « étonnement » du silico aluminate fondu et trempé, l'acide sulfurique à 65° Baumé peut le dissoudre; ce qui montre que la fusion diminue la résistance chimique du minéral. Aussi nous avons fondu le béryl au four solaire dans le but d'en faciliter une attaque chimique ultérieure.

### Fusion du béryl à la pression atmosphérique

Nous avons utilisé pour cette opération le grand réflecteur parabolique de 8,40 m de diamètre de la Bouzaréah, appareil prévu pour le traitement de mélanges gazeux, et particulièrement incommode pour fondre les solides. Le bloc de béryl est encastré dans la paroi d'un creuset de graphite en forme de poche. L'heure de l'opération, entre 9 h et 11 h 30, est choisie assez matinale pour éviter la chute du produit traité sur le miroir. Une partie de la roche est fondue et transformée en produit vitreux, blanc, opaque. Le « verre » de béryl ainsi obtenu est attaqué difficilement par l'acide sulfurique pur (à 98 p. 100)

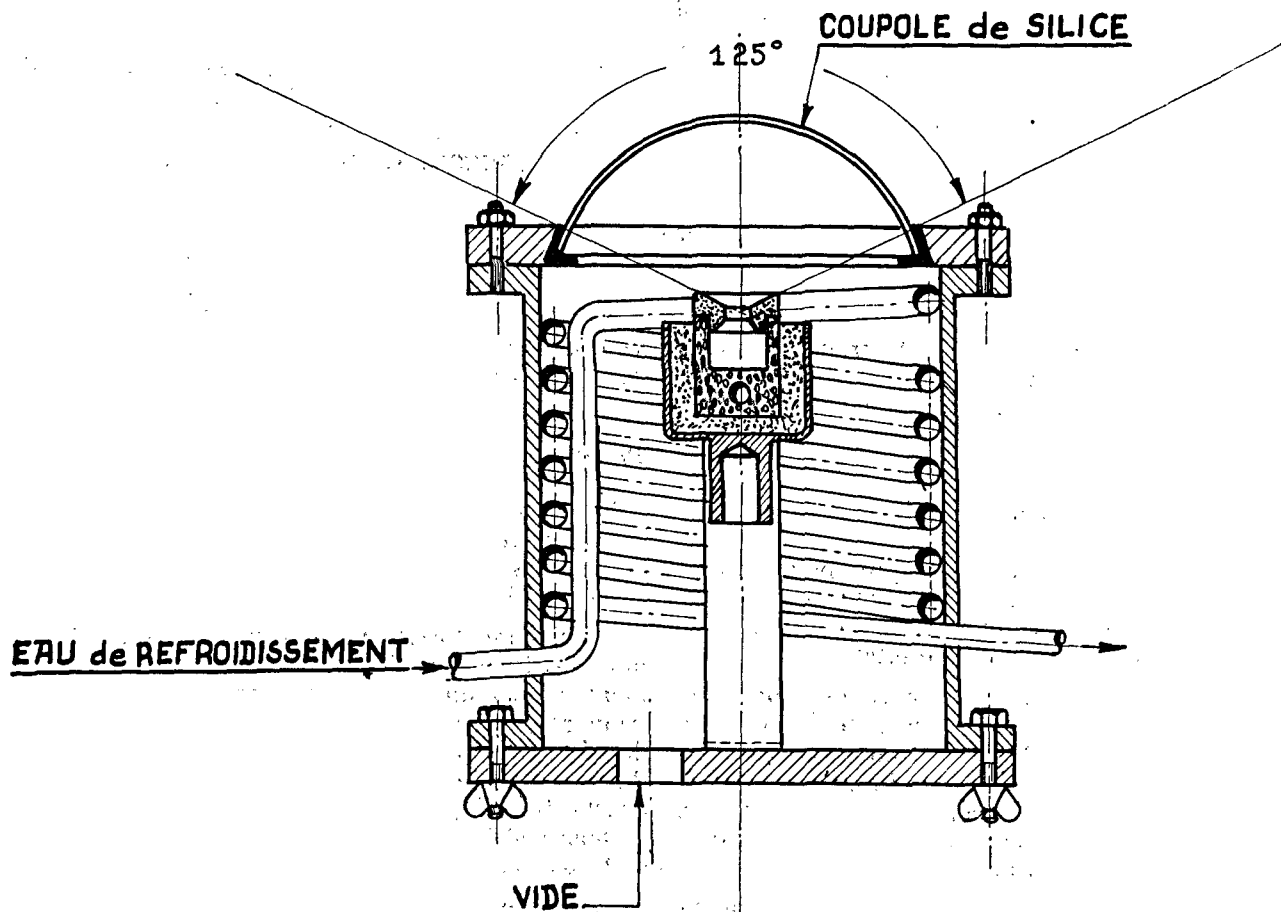


Figure 2

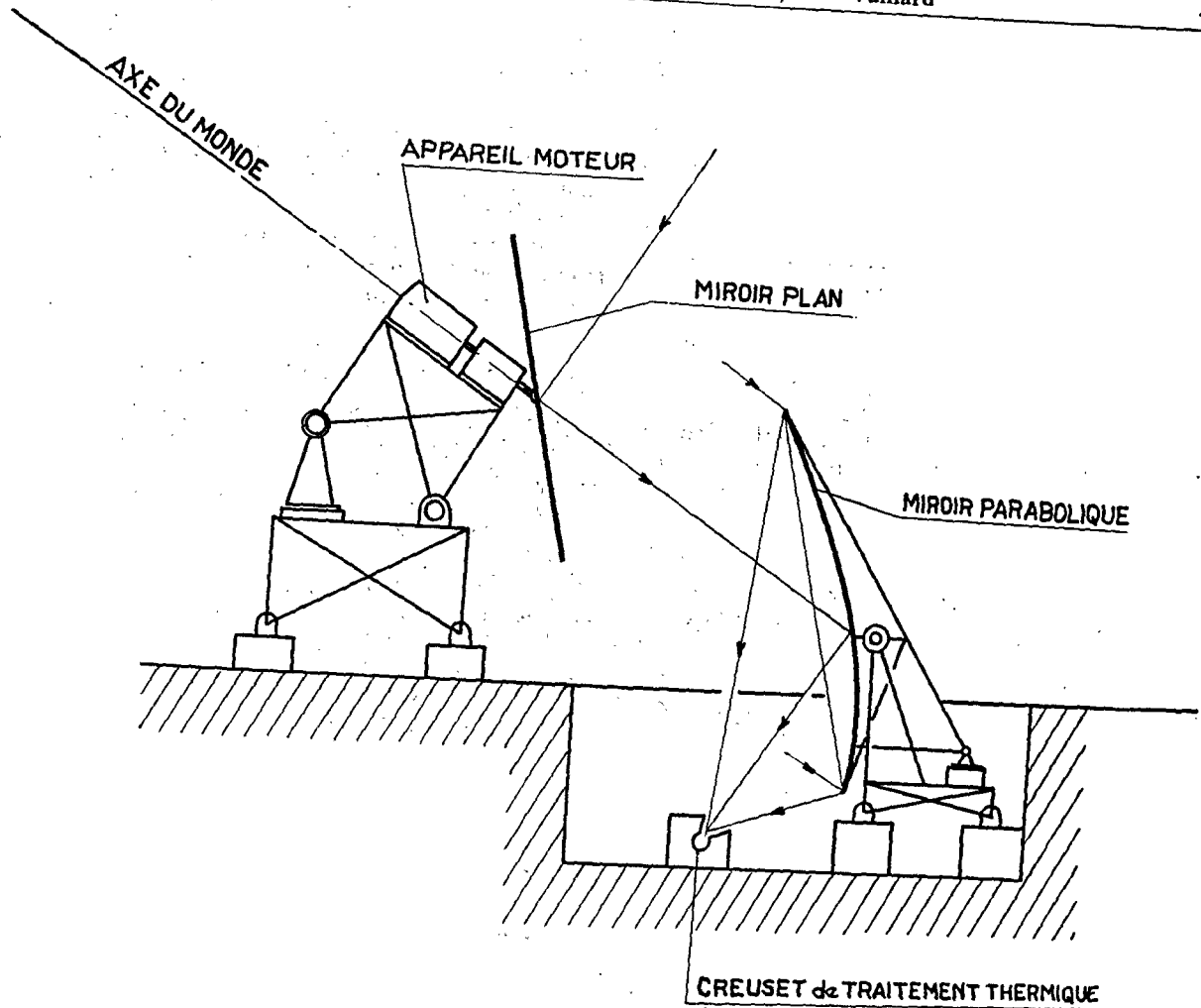


Figure 3

à l'ébullition. Après une heure de traitement, une notable quantité des cations  $Be^{++}$  et  $Al^{+++}$  est passée en solution. Un broyage après fusion rend l'attaque plus rapide.

*Fusion du béryl sous vide*

Le béryl placé sous vide dans un petit creuset de graphite du type décrit plus haut, est soumis à une concentration relativement importante d'énergie solaire pendant quelques minutes.

Une faible proportion du béryl est sublimée. Le reste du cristal est transformé en une sorte d'écume blanche, verdâtre par endroits, et légère (elle flotte sur l'acide sulfurique). Ce produit, manifestement soufflé de l'intérieur par le dégagement des gaz occlus, est friable et nettement plus réactif que les produits des fusions précédentes.

L'attaque par l'acide sulfurique concentré à chaud est rapide. Elle permet de faire passer la plus grande partie du béryllium en solution. Le béryl fondu sous

vide semble présenter une aptitude particulière pour des traitements chimiques directs, même sans broyage.

*Projets de four solaire pour le traitement du béryl*

Nos expériences préliminaires ont montré l'intérêt de la fusion du béryl, et plus particulièrement de la fusion sous vide, avant de procéder à l'attaque chimique du minéral.

Ce traitement exigeant de porter à plus de 1 500 °C une matière solide, les techniques utilisant directement le rayonnement d'un miroir parabolique ne peuvent pas convenir. Il nous faut donc concevoir des dispositifs à deux miroirs, l'un suivant le soleil dans sa course pour renvoyer dans une direction constante le faisceau intercepté, l'autre concentrant ce faisceau de haut en bas vers l'orifice du four où se trouve la matière à traiter.

La figure 3 représente un projet de four solaire prévu par la Section captation de notre institut, en vue de fondre du béryl.

### *Résumé*

Des fours à vide, de petites dimensions, chauffés à l'énergie solaire, ont été réalisés en vue de recherches théoriques et pratiques sur les réactions chimiques à hautes températures de 1 500 °C à 3 000 °C. Une synthèse du carbure de bore a permis d'obtenir des résultats positifs, bien qu'avec un rendement assez faible. Le traitement thermique sous vide du beryl pierreux le transforme en un produit soufflé particulièrement réactif.

### **PRODUCTION OF BORON CARBIDE AND HEAT TREATMENT OF MINERALS BY SOLAR FURNACES**

#### *Summary*

Small vacuum solar furnaces have been built for theoretical and practical research on high-temperature chemical reactions from 1500 to 3000°C. Boron carbide has been synthesized, though in low yield. Heat treatment of coarse beryl in a vacuum transforms it into a highly reactive porous mass.

# WHERE TO BUY UNITED NATIONS PUBLICATIONS ADRESSES OÙ LES PUBLICATIONS DE L'ONU SONT EN VENTE

## AFRICA/AFRIQUE

**CAMEROON/CAMEROUN:**  
LIBRAIRIE DU PEUPLE AFRICAINE  
La Géante, B. P. 1197, Yaoundé.  
DIFFUSION INTERNATIONALE CAMEROUNAISE  
DU LIVRE ET DE LA PRESSE, Sangmelima.

**CONGO (Léopoldville):** INSTITUT POLITIQUE  
CONGOLAIS, B. P. 2307, Léopoldville.

**ETHIOPIA/ÉTHIOPIE:** INTERNATIONAL  
PRESS AGENCY, P. O. Box 120, Addis Ababa.

**GHANA:** UNIVERSITY BOOKSHOP  
University College of Ghana, Legon, Accra.

**KENYA:** THE E.S.A. BOOKSHOP, Box 30167, Nairobi.

**LIBYA/LIBYE:**  
SUDKI EL JERBI (BOOKSELLERS)  
P. O. Box 78, Istiklal Street, Benghazi.

**MOROCCO/MAROC:** AUX BELLES IMAGES  
281 Avenue Mohammed V, Rabat.

**NIGERIA/NIGÉRIA:**  
UNIVERSITY BOOKSHOP (NIGERIA) LTD  
University College, Ibadan.

**NORTHERN RHODESIA/RHODÉSIE DU NORD:**  
J. BELDING, P. O. Box 750, Mutulira.

**NYASALAND/NYASALAND:**  
BOOKERS (NYASALAND) LTD.  
Lontyre House, P. O. Box 34, Blantyre.

**SOUTH AFRICA/AFRIQUE DU SUD:**  
VAN SCHAIK'S BOOK STORE (PTY.) LTD.  
Church Street, Box 724, Pretoria.

**TECHNICAL BOOKS (PTY.) LTD.,** Faraday House  
P. O. Box 2866, 40 St. George's Street, Cape Town.

**SOUTHERN RHODESIA/RHODÉSIE DU SUD:**  
THE BOOK CENTRE, First Street, Salisbury.

**TANGANYIKA:**  
DAR ES SALAAM BOOKSHOP  
P. O. Box 9030, Dar es Salaam.

**UGANDA/OUGANDA:**  
UGANDA BOOKSHOP, P. O. Box 145, Kampala.

**UNITED ARAB REPUBLIC/RÉPUBLIQUE ARABE UNIE:**  
LIBRAIRIE "LA RENAISSANCE D'ÉGYPTÉ"  
9 Sh. Adly Pasha, Cairo.

**AL NAHDA EL ARABIA BOOKSHOP**  
32 Abd-el-Khalek Sarwat St., Cairo.

## ASIA/ASIE

**BURMA/BIRMANIE:** CURATOR,  
GOVT. BOOK DEPOT, Rangoon.

**CAMBODIA/CAMBODGE:** ENTREPRISE KHMÈRE  
DE LIBRAIRIE  
Imprimerie & Papeterie, S. & R. L., Phnom-Penh.

**CEYLON/CEYLAN:** LAKE HOUSE BOOKSHOP  
Assoc. Newspapers of Ceylon, P. O. Box 244,  
Colombo.

**CHINA/CHINE:**  
THE WORLD BOOK COMPANY, LTD.  
99 Chung King Road, 1st Section, Taipei, Taiwan.

**THE COMMERCIAL PRESS, LTD.**  
211 Honan Road, Shanghai.

**HONG KONG/HONG-KONG:**  
THE SWINDON BOOK COMPANY  
25 Nathan Road, Kowloon.

**INDIA/INDE:**  
ORIENT LONGMANS  
Bombay, Calcutta, Hyderabad, Madras & New Delhi.

**OXFORD BOOK & STATIONERY COMPANY**  
Calcutta & New Delhi.

**INDONESIA/INDONÉSIE:** PEMBANGUNAN, LTD.  
Gunung Sahari 84, Djakarta.

**JAPAN/JAPON:** MARUZEN COMPANY, LTD.  
6 Tori-Nichome, Nihonbashi, Tokyo.

**KOREA (REP. OF)/CORÉE (RÉP. DE):**  
EUL-YOO PUBLISHING CO., LTD.  
5, 2-KA, Chongno, Seoul.

**PAKISTAN:**  
THE PAKISTAN CO-OPERATIVE BOOK SOCIETY  
Dacca, East Pakistan.

**PUBLISHERS UNITED, LTD.,** Lahore.  
THOMAS & THOMAS, Karachi.

**PHILIPPINES:**  
PHILIPPINE EDUCATION COMPANY, INC.  
1104 Castillejos, P. O. Box 620, Quepos, Manila.

**POPULAR BOOKSTORE,** 1573 Doroteo Jose, Manila.

**SINGAPORE/SINGAPOUR:** THE CITY BOOK  
STORE, LTD., Collyer Quay.

**THAILAND/THAÛLANDE:**  
PRAMUAN MIT, LTD.  
55 Chakrawat Road, Wat Tuk, Bangkok.

**NIBONDH & CO., LTD.**  
New Road, Sikak Phya Sri, Bangkok.

**SUKSAPAN PANIT**  
Mansion 9, Rajadamnarn Avenue, Bangkok.

**VIET-NAM (REP. OF)/VIÊT-NAM (RÉP. DU):**  
LIBRAIRIE-PAPETERIE XUÂN THU  
185, rue Tu-do, B. P. 283, Saigon.

## EUROPE

**AUSTRIA/AUTRICHE:**  
GEROLD & COMPANY, Graben 31, Wien, I.  
GEORG FROMME & CO., Spengergasse 39, Wien, V.

**BELGIUM/BELGIQUE:** AGENCE  
ET MESSAGERIES DE LA PRESSE, S. A.  
14/22, rue du Persil, Bruxelles.

**BULGARIA/BULGARIE:** RAZNOIZNOS  
I, Tzar Assen, Sofia.

**CYPRUS/CHYPRE:** PAN PUBLISHING HOUSE  
10 Alexander the Great Street, Strovolos.

**CZECHOSLOVAKIA/TCHÉCOSLOVAQUIE:**  
ARTIA LTD., 30 ve Smetkách, Praha, 2.

**DENMARK/DANEMARK:** EJNAR MUNKSGAARD, LTD.  
Nørregade 6, København, K.

**FINLAND/FINLANDE:** AKATEEMINEN KIRJAKAUPPA  
2 Keskuskatu, Helsinki.

**FRANCE:** ÉDITIONS A. PÉDONE  
13, rue Soufflot, Paris (V°).

**GERMANY (FEDERAL REPUBLIC OF)/  
ALLEMAGNE (RÉPUBLIQUE FÉDÉRALE D'):**  
R. EISENSCHMIDT  
Schwanthaler Str. 59, Frankfurt/Main.  
ELWERT UND MEURER  
Hauptstrasse 101, Berlin-Schöneberg.  
ALEXANDER HORN  
Spiegelgasse 9, Wiesbaden.  
W. E. SAARBACH  
Gertrudenstrasse 30, Köln (I).

**GREECE/GRÈCE:** KAUFFMANN BOOKSHOP  
28 Stadion Street, Athens.

**HUNGARY/HONGRIE:** KULTURA  
P. O. Box 149, Budapest 62.

**ICELAND/ISLANDE:** BÓKAVERZLUN SIGFÁR  
EYJUNDSSONAR H. F.  
Austurstræti 18, Reykjavík.

**IRELAND/IRLANDE:**  
STATIONERY OFFICE, Dublin.

**ITALY/ITALIE:**  
LIBRERIA COMMISSIONARIA SANSONI  
Via Gino Capponi 26, Firenze.  
& Via Paolo Marconi 19/B, Roma.  
AGENZIA E.I.O.U., Via Meravigli 16, Milano.

**LUXEMBOURG:**  
LIBRAIRIE J. TRAUSSCHUMMER  
Place du Théâtre, Luxembourg.

**NETHERLANDS/PAYS-BAS:**  
N. V. MARTINUS NIJHOFF  
Lange Voorhout 9, 's-Gravenhage.

**NORWAY/NORVÈGE:** JOHAN GRUNDT TANUM  
Karl Johansgate, 41, Oslo.

**POLAND/POLOGNE:** PAN, Pałac Kultury i Nauki,  
Warszawa.

**PORTUGAL:** LIVRARIA RODRIGUES & CIA,  
186 Rua Aurea, Lisboa.

**ROMANIA/ROUMANIE:** CARTIMEX  
Str. Aristide Briand 14-18,  
P. O. Box 134-135, Bucureşti.

**SPAIN/ESPAGNE:**  
LIBRERIA BOSCH, Ronda Universidad 11, Barcelona.  
LIBRERIA MUNDI-PRENSA, Castelló 37, Madrid.  
AGUILAR S. A. DE EDICIONES, Juan Bravo 38, Madrid 6.

**SWEDEN/SUÈDE:** C. E. FRITZE'S  
KUNGL. HOVBOKHANDEL A-B  
Fredsgatan 2, Stockholm.

**SWITZERLAND/SUISSE:**  
LIBRAIRIE PAYOT, S. A., Lausanne, Genève.  
HANS RAUNHARDT, Kirchgasse 17, Zürich 1.

**TURKEY/TURQUIE:** LIBRAIRIE HACHETTE  
469 Istiklal Caddesi, Beyoğlu, Istanbul.

**UNION OF SOVIET SOCIALIST REPUBLICS/  
UNION DES RÉPUBLIQUES SOCIALISTES  
SOVIÉTIQUES:** MEZHUNARODNAYA  
KNYGA, Smolenskaya Ploshchad, Moskva.

**UNITED KINGDOM/ROYAUME-UNI:**  
H. M. STATIONERY OFFICE  
P. O. Box 569, London, S.E. 1  
(and HMSO branches in Belfast, Birmingham,  
Bristol, Cardiff, Edinburgh, Manchester).

**YUGOSLAVIA/YOUGOSLAVIE:**  
CANKARJEVA ZALOŽBA  
Ljubljana, Slovenia.  
DRAVNO PREDUZEĆE  
Jugoslovenska Knjiga, Terazije 27/11, Beograd.  
PROSVJETA  
5, Trg Bratstva i Jedinstva, Zagreb.  
PROSVETA PUBLISHING HOUSE  
Import-Export Division, P. O. Box 559,  
Terazije 16/1, Beograd.

## LATIN AMERICA/ AMÉRIQUE LATINE

**ARGENTINA/ARGENTINE:** EDITORIAL  
SUDAMERICANA, S. A., Alsina 500, Buenos Aires.

**BOLIVIA/BOLIVIE:** LIBRERIA SELECCIONES  
Casilla 972, La Paz.

**LOS AMIGOS DEL LIBRO**  
Calle Perú esq. España, Casilla 450, Cochabamba.

**BRAZIL/BRÉSIL:** LIVRARIA AGIR  
Rua México 98-B, Caixa Postal 3291,  
Rio de Janeiro.

**LIVRARIA FREITAS BASTOS, S. A.**  
Caixa Postal 899, Rio de Janeiro.

**LIVRARIA KOSMOS EDITORA**  
Rua Rosario 135/137, Rio de Janeiro.

**CHILE/CHILI:**  
EDITORIAL DEL PACÍFICO  
Ahumada 57, Santiago.

**LIBRERIA IVENS, Casilla 205, Santiago.**

**COLOMBIA/COLOMBIE:**  
LIBRERIA AMERICA, Calle 51 Núm. 49-58, Medellín.

**LIBRERIA BUCHHOLZ**  
Av. Jiménez de Quesada 8-40, Bogotá.

**COSTA RICA:** IMPRENTA Y LIBRERIA TREJOS  
Apartado 1313, San José.

**CUBA:** CUBARTIMPEX  
Apartado Postal 6540, La Habana.

**DOMINICAN REPUBLIC/RÉPUBLIQUE  
DOMINICAINE:** LIBRERIA DOMINICANA  
Mercedes 49, Santo Domingo.

**ECUADOR/ÉQUATEUR:**  
LIBRERIA CIENTIFICA, Casilla 362, Guayaquil.  
LIBRERIA UNIVERSITARIA  
Calle Garcia Moreno 739, Quito.

**EL SALVADOR:**  
LIBRERIA CULTURAL SALVADOREÑA  
2a. Av. Sur, San Salvador.  
MANUEL NAVAS Y CIA,  
1a. Avenida Sur 37, San Salvador.

**GUATEMALA:**  
LIBRERIA CERVANTES  
5a. Av. 9-39, Zona 1, Guatemala.  
SOCIEDAD ECONOMICA-FINANCIERA  
6a. Av. 14-33, Guatemala.

**HAITI/HAÏTI:**  
LIBRAIRIE "A LA CARAVELLE", Port-au-Prince.

**HONDURAS:**  
LIBRERIA PANAMERICANA, Tegucigalpa.

**MEXICO/MEXIQUE:** EDITORIAL HERMES, S. A.  
Ignacio Mariscal 41, México, D. F.

**PANAMA:** JOSE MENENDEZ  
Agencia Internacional de Publicaciones,  
Apartado 2052, Av. 8A, sur 21-58, Panamá.

**PARAGUAY:** AGENCIA DE LIBRERIAS  
DE SALVADOR NIZZA  
Calle Pte. Franco No. 39-43, Asunción.

**PERU/PÉROU:** LIBRERIA INTERNACIONAL  
DEL PERU, S. A., Casilla 1417, Lima.  
LIBRERIA STUDIUM, S. A.,  
Amarigua 939, Apartado 2139, Lima.

**URUGUAY:** LIBRERIA RAFAEL BARRETT  
Ramón Anador 4030, Montevideo.  
REPRESENTACION DE EDITORIALES, PROF. H. D'ELIA  
Plaza Caganca 1342, 1° piso, Montevideo.

**VENEZUELA:** LIBRERIA DEL ESTE  
Av. Miranda, No. 52, Edif. Galipán, Caracas.

## MIDDLE EAST/MOYEN-ORIENT

**IRAN:** MEHR AYIN BOOKSHOP  
Abbas Abad Avenue, Isfahan.

**IRAQ/IRAQ:**  
MACKENZIE'S BOOKSHOP, Baghdad.

**ISRAEL/ISRAËL:** BLUMSTEIN'S BOOKSTORES  
35 Allenby Rd. & 48 Nachlat Benjamin St.,  
Tel Aviv.

**JORDAN/JORDANIE:** JOSEPH I. SAHOU & CO.  
Dar-ul-Kutub, Box 66, Amman.

**LEBANON/LIBAN:**  
KHAYAT'S COLLEGE BOOK COOPERATIVE  
92-94, rue Bliss, Beirut.

## NORTH AMERICA/ AMÉRIQUE DU NORD

**CANADA:** THE QUEEN'S PRINTER  
Ottawa, Ontario.

**UNITED STATES OF AMERICA/  
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE:**  
SALES SECTION, UNITED NATIONS, New York.  
Porto Rico: PAN AMERICAN BOOK CO.  
P. O. Box 3511, San Juan 17.  
BOOKSTORE, UNIVERSITY OF PUERTO RICO  
Rio Piedras.

## OCEANIA/OCCÉANIE

**AUSTRALIA/AUSTRALIE:**  
U. N. ASSOCIATION OF AUSTRALIA  
Mewan House, 343 Little Collins St., Melbourne C.1, Vic.  
WEB BOOKROOM, University, Adelaide, S.A.  
UNIVERSITY BOOKSHOP, St. Lucia, Brisbane, Qld.  
THE EDUCATIONAL AND TECHNICAL BOOK AGENCY  
Parap Shopping Centre, Darwin, N.T.  
COLLINS BOOK DEPOT PTY. LTD.  
Monash University, Wellington Road, Clayton, Vic.  
COLLINS BOOK DEPOT PTY. LTD.,  
363 Swanston Street, Melbourne, Vic.  
THE UNIVERSITY BOOKSHOP, Nedlands, W.A.  
UNIVERSITY BOOKROOM  
University of Melbourne, Parkville N.2, Vic.  
UNIVERSITY CO-OPERATIVE BOOKSHOP LIMITED  
Manning Road, University of Sydney, N.S.W.

**NEW ZEALAND/NOUVELLE-ZÉLANDE:**  
GOVERNMENT PRINTING OFFICE  
Private Bag, Wellington  
(and Government Bookshops in Auckland,  
Christchurch and Dunedin).

## WEST INDIES/ INDES OCCIDENTALES

**BERMUDA/BERMUDES:** BERMUDA BOOK STORES  
Reid and Burnaby Streets, Hamilton.

**BRITISH GUIANA/GUYANE BRITANNIQUE:**  
BOOKERS STORES, LTD.  
20-23 Church Street, Georgetown.

**CURAÇAO, N.W.I./CURAÇAO (ANTILLES  
NÉERLANDAISES):**  
BOKHANDEL SALAS, P. O. Box 44.

**JAMAICA/JAMAÏQUE:** SANGSTERS BOOK ROOM  
91 Harbour Street, Kingston.

**TRINIDAD AND TOBAGO/TRINITÉ ET TOBAGO:**  
CAMPBELL BOOKER LTD., Port of Spain.

Orders and inquiries from countries where sales agencies have not yet been established may be sent to: Sales Section, United Nations, New York, U.S.A., or to Sales Section, United Nations, Palais des Nations, Geneva, Switzerland.  
Les commandes et demandes de renseignements émanant de pays où n'existe pas encore de bureaux de vente peuvent être adressées à la Section des ventes, ONU, New York (É.-U.), ou à la Section des ventes, ONU, Palais des Nations, Genève (Suisse).

[64B1]