



Quarante-quatrième session
Point 5 c) de l'ordre du jour

QUESTIONS RELATIVES A LA SCIENCE ET A LA TECHNIQUE

LA POLLUTION DU MILIEU ET LES MOYENS D'Y FAIRE FACE

Rapport de l'Organisation mondiale de la santé

ANNEXES

- I. Recherche sur la pollution du milieu
- II. Centres internationaux de référence de l'OMS
- III. Supplément d'information fourni par l'OMM sur la pollution de l'air

Blank page

Page blanche

Blank page

Page blanche

ANNEXE I

RECHERCHE SUR LA POLLUTION DU MILIEU

Le présent document, rédigé sous la direction du docteur W. H. H. Jebb, Directeur du Laboratoire de santé publique d'Oxford (Royaume-Uni), expose l'avis collectif de plusieurs groupes d'experts sur les problèmes de la pollution de l'atmosphère, des eaux et du sol. Il résume leurs principales conclusions et recommandations concernant les besoins en matière de recherche.

RECHERCHE SUR LA POLLUTION DU MILIEU

TABLE DES MATIERES

	<u>Pages</u>
Introduction	8
Concepts fondamentaux de l'évaluation des dangers du milieu	9
Effets localisés aux points de contact et d'entrée	10
Absorption et diffusion	10
Importance de la variabilité normale	12
Effets sur les mécanismes régulateurs	12
Evolution récente en matière de pollution du milieu	13
Modes de transmission de la pollution à l'homme	18
I. POLLUTION ATMOSPHERIQUE	19
Objectifs des études sur la pollution atmosphérique	19
Principes et procédés d'échantillonnage	22
Mesure de la pollution atmosphérique	26
Les effets biologiques en tant qu'indicateurs de pollution	35
Choix des dispositifs et des instruments	36
Nature du problème	36
Instruments destinés à l'échantillonnage des poussières	38
Gaz et vapeurs	39
Méthodes indirectes	39
Mesures météorologiques	40
Matériel auxiliaire	40
Présentation des résultats	40
La météorologie et la mesure de la pollution de l'air	43
Dangers de certains polluants atmosphériques pour l'homme	45
Dangers à long terme de la pollution de l'air	49
Le mécanisme de l'action des polluants et de leur absorption par les voies respiratoires; méthodes d'étude	51
Preuves des effets à long terme sur l'homme	54

TABLE DES MATIERES (suite)

	<u>Pages</u>
Effets de la pollution, notamment sur le système respiratoire, mis en évidence en laboratoire	55
Expositions combinées	55
Etudes fonctionnelles	56
Etudes biochimiques	57
Effets sur la reproduction et génétique animale	58
Rétention du polluant	58
Production de tumeurs	59
Moyens de lutter contre la pollution atmosphérique et de la prévenir ...	59
II. POLLUTION DES EAUX	61
Tendances actuelles et conséquences sanitaires de l'accroissement de la pollution	61
Contamination chimique de l'eau	63
Origine des polluants	63
Nature et concentration des polluants	64
Normes toxicologiques	68
Les aliments tirés du milieu aquatique	69
Problèmes actuels	69
Les détergents synthétiques et leurs résidus	69
Autres substances organiques synthétiques	71
Les dangers à long terme de la pollution des eaux	75
Métaux contenus dans l'eau	77
Les pesticides contenus dans l'eau	80
III. POLLUTION DU SOL	83
L'ampleur du problème et ses incidences sur la santé	83
Contamination chimique du sol	84
Projets de recherche	87
Généralités	87
Recherches sur la mutagénicité et la cancérogénicité, liées à la pollution de l'air, des eaux et des aliments	89
Mutagénicité	89
Cancérogénicité	90/...

TABLE DES MATIERES (suite)

	<u>Pages</u>
Pollution atmosphérique	94
Méthodes de recherche sur la pollution atmosphérique	94
Pollution des eaux	97
Recherches sur la pollution des eaux	97
Recherches en cours	98
Autres études épidémiologiques chez l'homme	100
Problèmes sur lesquels doit porter la recherche	104
Normalisation des observations	107
Expériences sur les animaux	108
Etudes sur les enzymes	109
Métabolisme des polluants absorbés	110
Etudes des effets cancérigènes et mutagènes	110
Effets à long terme des polluants sur le vieillissement	110
APPENDICE I. Composition des groupes scientifiques sur les différents aspects de la pollution du milieu qui se sont réunis à Genève de mars 1963 à novembre 1965	111
APPENDICE II. Bibliographie sommaire	119

RECHERCHES SUR LA POLLUTION DU MILIEU

Depuis 1963, plusieurs groupes scientifiques qui s'intéressent aux divers aspects de la pollution du milieu se réunissent à Genève, et leurs recommandations figurent dans le document intitulé Polluants microchimiques du milieu (MHO/PA/110.63) et dans les rapports présentés au Directeur général par le Groupe scientifique sur l'évaluation biologique des niveaux de pollution des eaux (MHO/PA/136.64), le Groupe scientifique sur les aspects biologiques de la pollution microchimique des réseaux hydrauliques (MHO/PA/143.64), le Groupe scientifique de recherche sur la pollution du milieu (PA/236.64), le Groupe scientifique sur les effets sanitaires à long terme des nouveaux polluants (PA/37.65) et le Groupe scientifique sur l'identification et la mesure des polluants atmosphériques (PA/66/19). Les rapports au Directeur général n'ont pas été publiés et l'on n'envisage pas de le faire, mais le nom des membres de chaque groupe scientifique figure à l'appendice I.

Le présent rapport résume les principales conclusions et recommandations formulées par ces groupes scientifiques. Ceux-ci ont parfaitement conscience des risques de pollution du milieu par les substances radioactives, mais il n'en est presque pas question dans leurs rapports.

Introduction

Les effets à long terme des divers contaminants du milieu sur la santé publique s'accroissent à mesure que s'opèrent les changements rapides liés à nombre d'activités humaines d'aujourd'hui.

Dans le passé, on s'est préoccupé de la contamination de l'atmosphère, du sol, des aliments et des eaux par les produits chimiques inorganiques et les débris, et il continuera certainement d'en être ainsi à l'avenir. Toutefois, on s'est moins soucieux d'un autre problème, à savoir les effets de l'introduction, dans le milieu, de produits chimiques organiques synthétisés par l'homme à certaines fins.

Chaque année, on invente des centaines de nouveaux produits chimiques organiques; certains d'entre eux sont des substances persistantes et plusieurs sont utilisés dans le monde entier. Au nombre de ces produits figurent de nouvelles matières plastiques et de nouveaux plastifiants; des détergents et des solvants synthétiques; des additifs alimentaires ou des additifs pour carburants ou alliages; et des pesticides. De plus en plus, les produits chimiques synthétiques sont utilisés dans les foyers domestiques, dans le matériel et le mobilier, dans les vêtements et les matériaux de construction. Nombre d'entre eux sont introduits directement ou indirectement dans les produits alimentaires, tandis que d'autres pénètrent dans les eaux de surface et les eaux souterraines ainsi que dans l'atmosphère.

Il convient d'examiner ensemble plutôt que séparément les divers types de pollution de l'atmosphère, des eaux et du sol. Il n'est pas rare que l'atmosphère, les eaux et le sol soient pollués par le même type de déchets. Par exemple, le déversement de scories en fusion des hauts-fourneaux entraîne la libération immédiate de gaz, la pollution des cours d'eau par l'infiltration des eaux de pluie et une altération de la surface des terres qui empêche ensuite une utilisation profitable du sol. Dans certains cas, la prévention d'une forme de pollution aboutit à créer une autre forme de pollution. Par exemple, on peut, par acidification et aération, séparer les cyanures des déchets liquides des usines d'électro-placage, mais il en résulte une pollution de l'atmosphère par l'acide cyanhydrique.

Parfois, les règlements de santé publique reposent sur l'hypothèse qu'il n'existe qu'un seul circuit d'exposition à la substance considérée. Pareille hypothèse est généralement erronée, et il est de plus en plus manifeste qu'il faut évaluer en même temps toutes les sources de pollution.

La pollution de l'atmosphère, des eaux ou du sol peut également exercer des effets nocifs sur la qualité des produits alimentaires. En effet, incontestablement, c'est, surtout par la chaîne alimentaire que parviennent à l'homme les contaminants radioactifs et les résidus de pesticides.

La pollution semble être la rançon de la technique industrielle moderne, de la rapidité et de la commodité des transports et du confort des habitations, mais si elle est excessive, elle risque d'affecter la santé de l'homme ainsi que son bien-être mental, social et économique. Dès lors, le problème consiste à déterminer le niveau de pollution permettant un développement économique et social optimal sans compromettre la santé dans son sens le plus large. On peut y arriver par l'application systématique des connaissances actuelles, complétées par les résultats de projets de recherche judicieusement choisis.

Concepts fondamentaux de l'évaluation des dangers du milieu

Lorsqu'on examine les effets à long terme que des niveaux peu élevés de contaminants du milieu humain produisent sur la santé, il faut analyser certains principes biologiques fondamentaux relatifs au sort de ces substances dans ou sur le corps humain et à leur action sur les diverses fonctions corporelles.

Ces problèmes sont complexes et l'on manque encore nettement de renseignements de base, et aussi de renseignements particuliers sur les diverses substances.

On pourrait ranger les effets des contaminants dans deux catégories :

- i) les effets localisés au point de contact et d'entrée, à savoir, principalement, les systèmes respiratoires et alimentaires et aussi, dans une certaine mesure, la peau et les tissus conjonctifs;
- ii) les effets qui se manifestent après l'absorption et la diffusion dans le corps.

Effets localisés aux points de contact et d'entrée

Au point de contact, l'absorption se fait probablement dans la zone extérieure de l'organe, dont les cellules les plus excentriques peuvent être influencées de diverses façons. La biochimie normale des cellules peut laisser apparaître des déviations aboutissant à la libération de substances qui sont transportées par le sang dans d'autres parties du corps, provoquant des états de tension ou contrariant les processus métaboliques dans d'autres parties du corps. Il peut aussi se produire des modifications de structure localisées. Des contacts locaux peuvent également donner lieu à des stimulations nerveuses localisées, ou se répercuter sur le système nerveux central.

Les modifications locales peuvent donner à l'organe une meilleure protection ou, en modifiant les conditions d'absorption ou de pénétration des substances étrangères, endommager son mécanisme naturel de défense.

On possède certaines connaissances quant aux effets de ces contacts, mais il existe bien des lacunes dans les connaissances fondamentales sur les effets éventuels à long terme des expositions. On n'est guère renseigné sur la formation de substances protectrices spécifiques.

Absorption et diffusion

Les produits chimiques absorbés ne contrarient la biochimie cellulaire que s'ils provoquent des réactions chimiques. L'accumulation de substances insolubles peut réduire les quantités de polluants entrant dans ces réactions. L'accumulation peut donc avoir pour effet d'exclure les polluants de processus biochimiques vitaux. Certains éléments et radicaux sont chimiquement identiques aux éléments constitutifs normaux, ou leur sont si semblables, qu'ils sont considérés comme tels et peuvent dès lors perturber les processus biochimiques normaux; les polluants peuvent aussi être transformés, par dégradation ou métabolisme, en substances qui sont ensuite évacuées. Il est des cas où des substances toxiques nouvelles se forment à l'intérieur du corps.

Si l'homme ne disposait pas de pareils mécanismes biochimiques pour se protéger des substances étrangères entrant dans son corps, il aurait succombé aux nombreuses substances naturelles qui lui sont étrangères, mais dont il est avéré qu'elles pénètrent dans son corps; absorbées à forte dose, nombre d'entre elles sont nocives. Cela correspond à ce que l'on sait d'expérience : jusqu'à présent, dans les animaux d'expérimentation - même soumis à une exposition prolongée - toutes les substances toxiques se sont présentées en débit de dose minimal, seuil en deçà duquel aucun effet discernable sur la santé ne se produit au cours de la durée normale de vie. Les exceptions possibles sont les substances mutagènes, tératogènes ou cancérogènes.

La plupart des recherches toxicologiques ont été consacrées aux effets nocifs de doses dépassant ce seuil. Toutefois, pour évaluer les effets à long terme, il importe d'être davantage renseigné sur les réactions biochimiques à des doses inférieures à ce seuil. Les enzymes normaux, particulièrement dans le foie, peuvent supprimer l'effet toxique des substances potentiellement nocives. Par exemple, on a constaté qu'en cas d'absorption chronique par l'homme, le rythme de conversion du DDT en DDE - bien moins toxique - s'élevait. Aussi le problème de l'induction d'enzymes d'adaptation est-il important. L'identification des enzymes capables de séparer les atomes de chlore et d'hydrogène du DDT et, éventuellement, d'autres composés organiques chlorés, ainsi que bien d'autres processus biochimiques détoxifiants, sont des domaines où il importe de poursuivre les recherches.

En approfondissant les connaissances de base sur les conditions générales dans lesquelles se font l'absorption, la diffusion, le métabolisme, l'accumulation et l'excrétion, on devrait pouvoir élaborer de meilleurs critères pour la réglementation de la santé publique. La nature des interactions biochimiques entre les agents toxiques et les rares enzymes normaux et autres éléments constitutifs des cellules n'est pas parfaitement comprise. Si on la connaissait, on pourrait peut-être dégager des principes biologiques généraux dont on se servirait pour créer des modèles permettant d'étudier le sort et les interactions des nouveaux produits chimiques lorsqu'ils entrent dans le corps humain.

Importance de la variabilité normale

Tous les processus et structures biologiques laissent apparaître des variations dans une "gamme normale" de variabilité. Cela traduit la faculté d'adaptation de l'homme à l'évolution de son milieu, dans les limites permises par sa structure génétique.

Si les effets des expositions de longue durée n'excèdent pas cette variation normale, on ne doit craindre aucune conséquence fâcheuse. Il ne faut craindre des dangers pour la santé que si les forces d'adaptation et les mécanismes de défense sont surmenés ou surstimulés.

Nombre d'agents, chimiques et physiques à l'action desquels l'homme est soumis, provoquent des réactions d'adaptation. Ces réactions biochimiques et physiologiques peuvent soit limiter la capacité de l'organisme à s'adapter aux effets d'autres facteurs, soit stimuler la faculté d'adaptation. Il importe de s'en souvenir pour comprendre les dangers que représentent pour la santé les expositions de longue durée. En raison de l'importance de ces mécanismes d'adaptation, il faudrait réaliser des expériences avec des combinaisons de polluants et autres facteurs d'agression.

Effets sur les mécanismes régulateurs

Outre les effets qu'exercent les polluants au niveau cellulaire et qui aboutissent à des déviations biochimiques et à des perturbations structurelles, il peut y avoir des effets sur la régulation homéostatique du corps, sur la stimulation ou l'inhibition du système nerveux, sur le système régulateur hormonal et sur l'immuno-réaction du système réticulo-endothélial.

Les connaissances relatives à ces mécanismes régulateurs sont très fragmentaires. Les effets discernables causés dans ces processus n'ont pas nécessairement tous des conséquences fâcheuses ou durables pour la santé. Si certaines réactions sont maintenant discernables c'est peut-être uniquement parce que des techniques nouvelles permettent de mieux connaître les conditions sanitaires de base et les processus d'adaptation au milieu.

Il se peut que d'autres mesures de défense sanitaire renforcent la faculté d'adaptation de l'homme à l'évolution ou ses conditions de vie. Après tout, durant toute la période de leur évolution, les ancêtres de l'homme se sont adaptés aux

changements des conditions de vie sur la terre. Une meilleure nutrition et une amélioration des conditions de logement et du milieu aident peut-être l'homme à supporter le fardeau de l'adaptation aux agents physiques et chimiques auquel il est exposé mais, si tel est le cas, il ne faut pas s'en prévaloir pour retarder l'application de critères de pureté plus stricts pour l'air et pour l'eau.

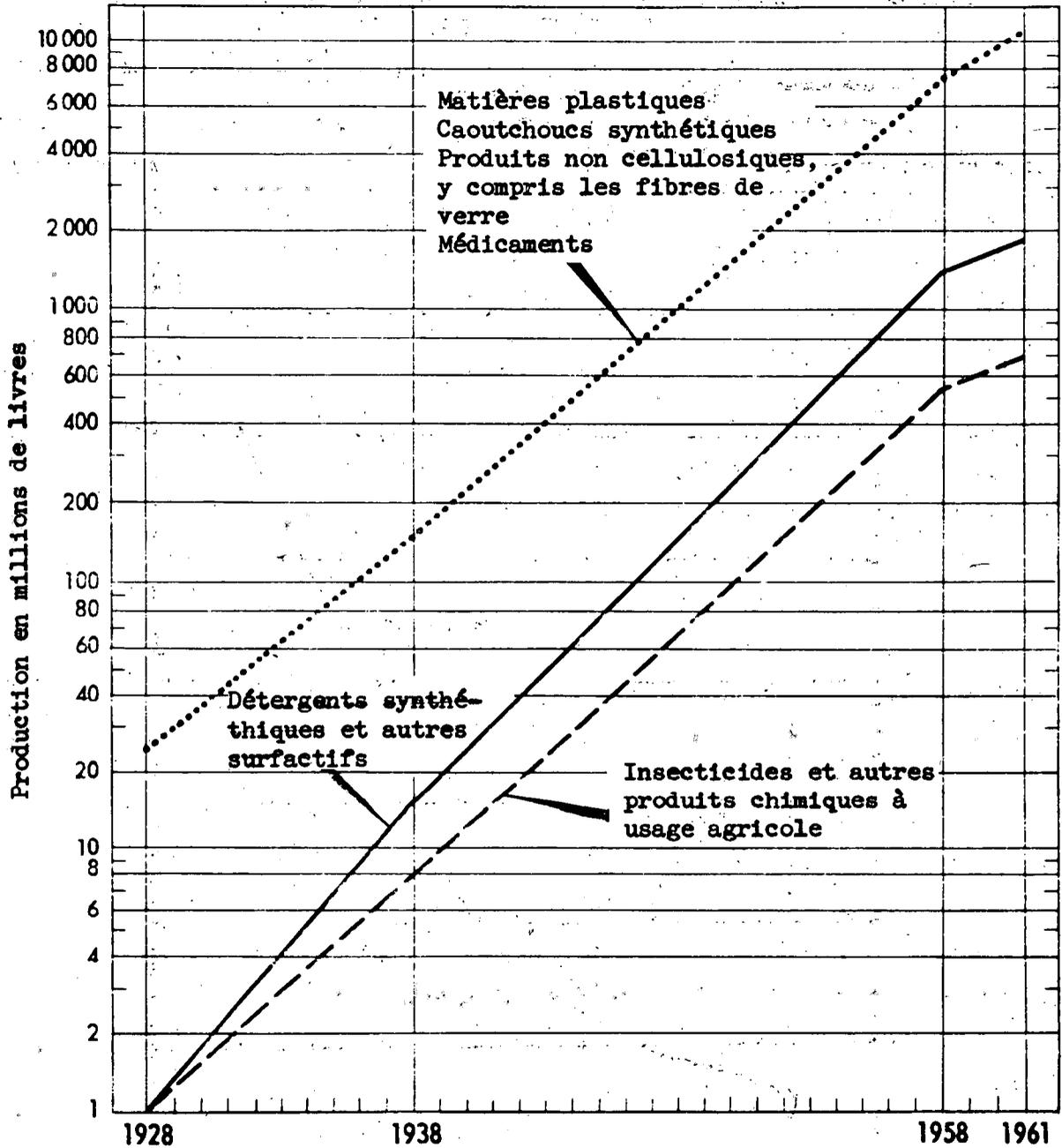
Il faut recourir à de nouvelles méthodes de recherche pour préciser les concepts fondamentaux de la biologie du milieu; en d'autres termes, il faut disposer de connaissances approfondies sur les réactions des organismes vivants face à l'évolution du milieu. A cette fin, les spécialistes de la biologie humaine doivent collaborer avec les microbiologistes, les botanistes et les zoologistes. Le sort des nouveaux polluants chimiques qui contaminent les eaux ou le sol où vivent nombre d'autres organismes entraîne des perturbations écologiques de la nature; il importe d'observer ces effets pour comprendre la biologie du milieu humain.

Evolution récente en matière de pollution du milieu

Il ne fait guère de doute que la pollution du milieu humain augmente. Il n'est pas possible de donner des estimations directes du volume de polluants chimiques actuellement libérés dans le milieu. Toutefois, les chiffres de production de groupes importants de produits chimiques organiques synthétiques peuvent servir de guide à cet égard (voir figures 1, 2 et 3). On dispose de renseignements pour l'Europe occidentale et les Etats-Unis d'Amérique. Comme il ressort des figures 2 et 3, en Europe occidentale, la production totale de produits chimiques a plus que doublé en huit ans (1953-1960). Toutefois, durant la période considérée, l'augmentation de la production des produits chimiques qui nous intéressent a été encore plus nette : la production de produits pétrochimiques s'est accrue de huit fois, celle des matières plastiques, de près de quatre fois, et celle des produits pharmaceutiques, de près de trois fois. Pour les Etats-Unis, les augmentations correspondantes sont de quatre fois pour les matières plastiques, près de trois fois pour les détergents synthétiques et un peu plus de trois fois pour les

FIG. 1

ACCROISSEMENT DE LA PRODUCTION DE PRODUITS CHIMIQUES
SYNTHETIQUES ORGANIQUES AUX ETATS-UNIS

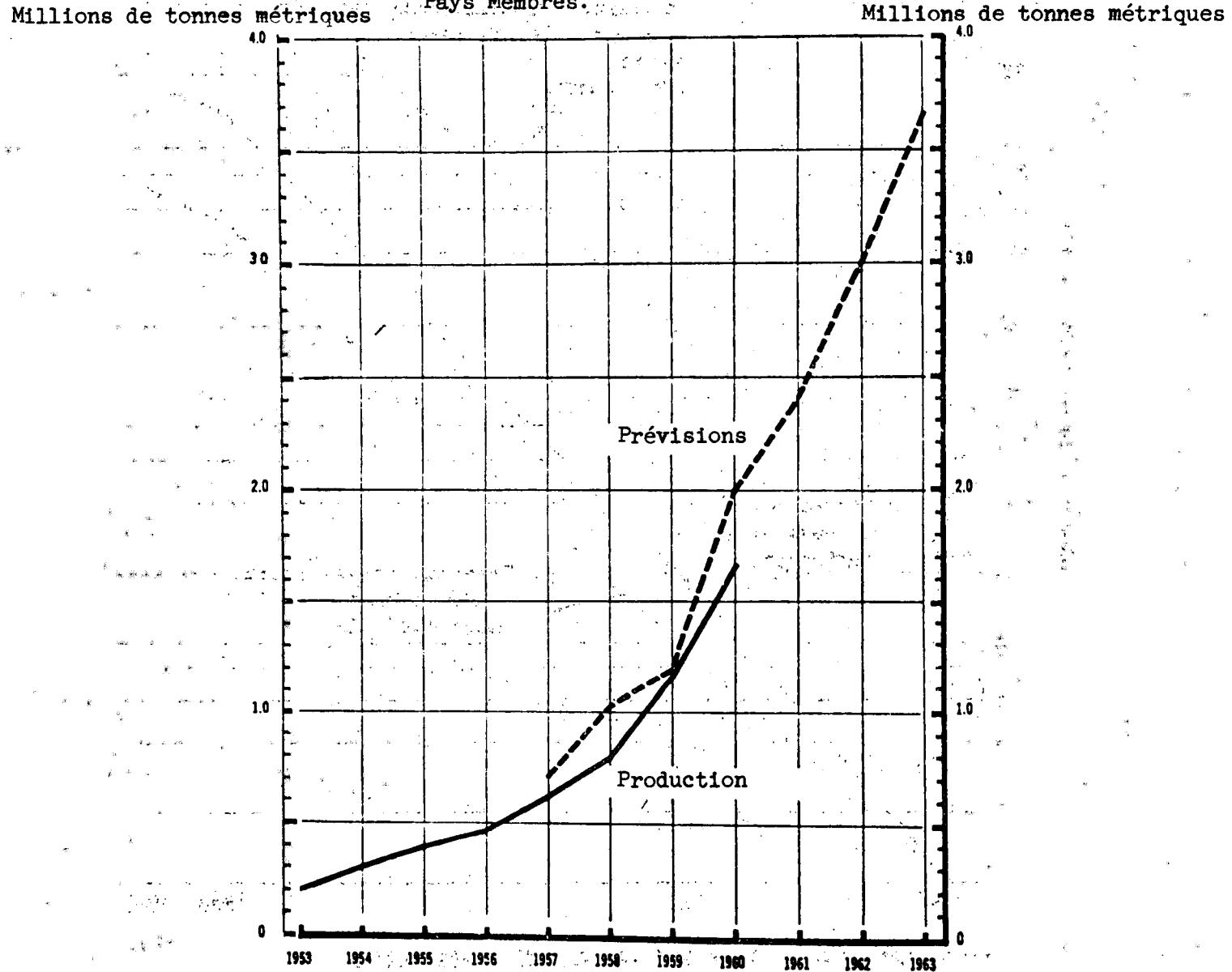


(Renseignements fournis par la US Tariff Commission)

FIG. 2

EVOLUTION DE LA PRODUCTION PETROCHIMIQUE DE 1953 A 1960 ET PREVISIONS
CONCERNANT LA CAPACITE DE PRODUCTION JUSQU'EN 1963 DANS LES PAYS
D'EUROPE OCCIDENTALE

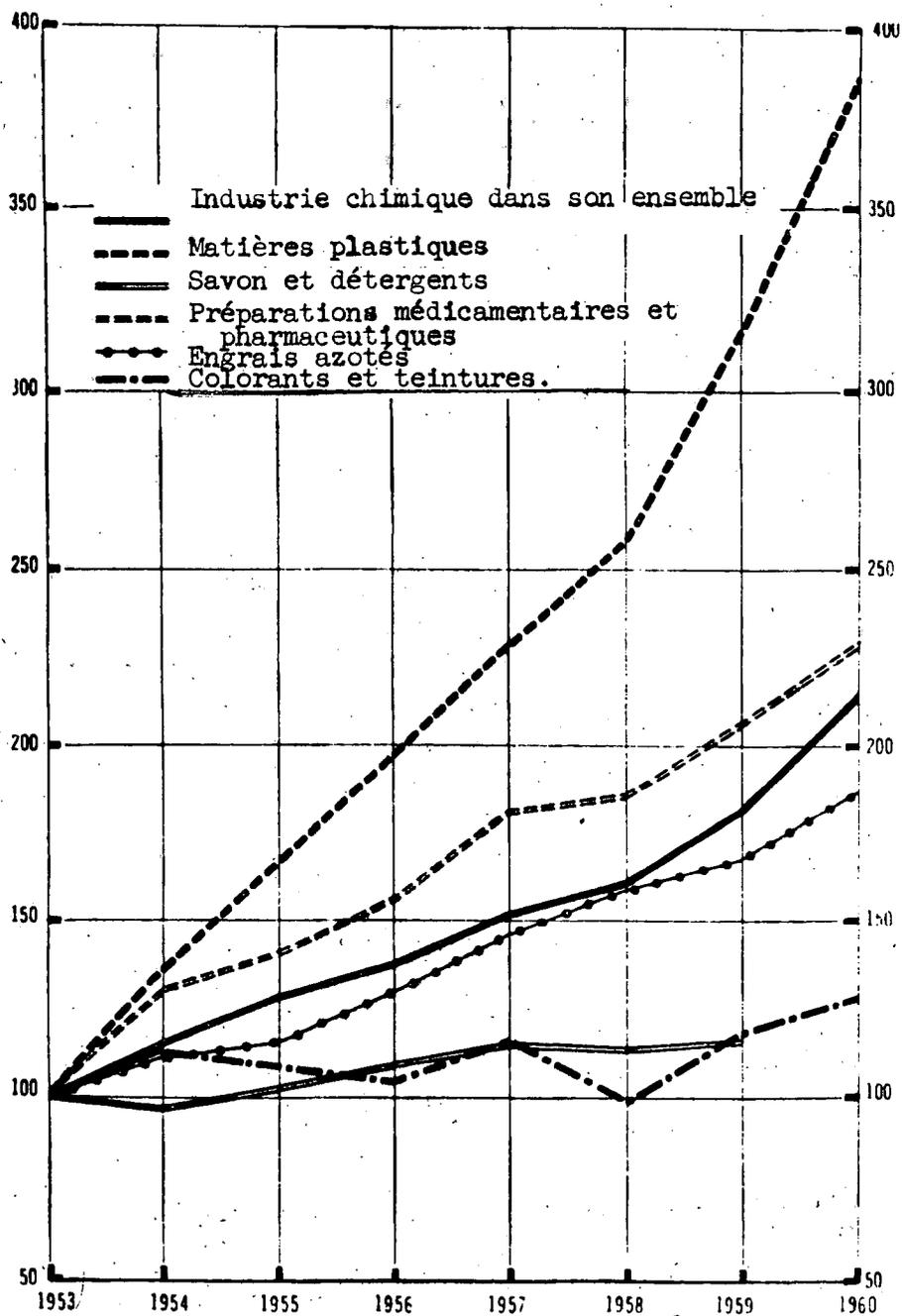
— Production de produits pétrochimiques des Pays Membres, exprimée
en teneur en carbone.
- - - - - Prévisions à deux ans concernant la capacité de production des
Pays Membres.



(Extrait de The Chemical Industry in Europe 1960-1961, OCDE).

FIG. 3

EVOLUTION DE L'INDUSTRIE CHIMIQUE ET DE CERTAINS SECTEURS
EN EUROPE OCCIDENTALE
1953 = 100



(Extrait de The Chemical Industry in Europe 1960-1961, OCDE)

pesticides. Un fait important est l'accroissement rapide de la production des insecticides aux Etats-Unis; des rapports concernant l'Europe, non n'a pu dégager les chiffres correspondants. Toutefois, pour ce qui est de la production de détergents synthétiques, les pays d'Europe occidentale ont enregistré en 1960 et 1961 un chiffre total voisin de celui des Etats-Unis pour ces deux années, le taux d'augmentation étant à peu près le même.

Les augmentations enregistrées dans les figures 1, 2 et 3 n'influeraient pas toutes sur les divers milieux. Il y a eu des échanges de produits chimiques entre les deux continents et des exportations vers d'autres parties du monde. Néanmoins, il est évident que parmi les grands changements des dix dernières années, la production de produits chimiques - et en particulier de produits chimiques organiques synthétiques - occupe une place importante. Il y a donc de bonnes raisons d'examiner les effets éventuels de ces produits chimiques sur le milieu humain et sur l'homme lui-même.

La pollution de l'atmosphère par les fumées diminue dans les pays développés à la suite de l'amélioration des techniques de combustion et du remplacement du charbon par le mazout ou le gaz naturel, tandis que les concentrations de certains polluants récents, tels que les gaz d'échappement des automobiles, sont en progression. Dans les pays en voie de développement où le rythme élevé de l'industrialisation et de l'urbanisation entraîne une utilisation accrue de carburants, de brûleurs et de produits chimiques industriels, on peut s'attendre à voir augmenter la pollution.

En raison de l'accroissement sensible du parc des véhicules automobiles, la pollution atmosphérique par les gaz d'échappement a posé des problèmes dans plusieurs grandes villes. Le phénomène complexe et nouveau de la pollution photochimique, noté pour la première fois à Los Angeles, a été observé dans d'autres villes où la densité des automobiles, la stagnation de l'air et l'intensité des rayonnements de courte longueur d'onde sont suffisantes pour favoriser les réactions photochimiques.

Les polluants principalement dégagés par les véhicules automobiles - vapeurs d'hydrocarbures et bioxyde d'azote - ne sont pas nocifs dans les conditions de concentration normalement observées dans l'atmosphère des villes, à moins qu'ils n'entrent dans des réactions photochimiques. Le bioxyde d'azote à faible concentration s'oxyde lentement dans l'air ambiant au contact du peroxyde d'azote, mais

la réaction se produit plus rapidement en présence de vapeurs d'hydrocarbures. A concentration égale, le peroxyde d'azote est plus nocif que le bioxyde d'azote, mais il faut pousser plus loin les travaux pour évaluer la concentration à laquelle il attaque les poumons.

Deux polluants - l'oxyde de carbone et le plomb - émis par les véhicules automobiles sont également préoccupants, bien qu'ils n'entrent pas dans des réactions photochimiques polluantes. L'oxyde de carbone se combine de manière réversible (la demi-vie biologique étant de l'ordre de trois heures) avec l'hémoglobine du corps, et il empêche le transport de l'oxygène. Dans beaucoup de villes, la pollution par les gaz d'échappement est suffisante pour que 1 à 6 p. 100 de l'hémoglobine du corps de tous les habitants exposés soit inactive. Le plomb inorganique est libéré par la décomposition du plomb tétraéthyle utilisé comme additif dans les carburants. L'atmosphère de Los Angeles contient jusqu'à deux fois plus de plomb que celle des autres grandes villes.

Certains pays développés ont mis en vigueur des dispositions législatives réglementant le déversement de déchets industriels dans les égouts et les cours d'eau, mais nombre de pays en voie de développement dont le progrès technique est rapide manquent de personnel qualifié, de matériel, etc., pour évaluer et combattre la pollution du milieu.

Modes de transmission de la pollution à l'homme

Toute distinction entre les substances polluantes fondée sur le mode de transmission - air, eau ou aliments - est artificielle; en effet, un produit chimique pulvérisé sur des cultures, par exemple, peut être respiré, ou entrer directement en contact avec la peau ou les tissus conjonctifs, ou aboutir par infiltration dans un cours d'eau et être bu ensuite, ou être ingéré avec le produit considéré ou avec des poissons pêchés dans le cours d'eau. Mais il est commode d'établir cette distinction à des fins de description. Toutefois, la plupart des polluants du milieu atteignent généralement l'homme d'une certaine façon plutôt que d'une autre; aussi examinera-t-on séparément les divers modes de transmission.

I. POLLUTION ATMOSPHERIQUE

Objectifs des études sur la pollution atmosphérique

a) Principaux objectifs des mesures de la pollution atmosphérique. La souillure de l'atmosphère par les déchets de l'activité humaine, particulièrement dans les agglomérations urbaines, s'aggrave rapidement dans le monde entier. Il convient d'évaluer chaque problème de pollution atmosphérique d'après ses caractéristiques particulières, mais les sources de pollution, d'une manière générale, peuvent être classées en plusieurs grandes catégories : combustion du charbon et du mazout dans les foyers domestiques, l'industrie et les centrales thermiques; substances émises par les véhicules à moteurs; effluents industriels; et diverses activités commerciales et collectives telles que l'incinération de débris solides, les pertes de solvants, et l'emploi de pesticides et de produits chimiques à usage agricole.

b) Évaluation préliminaire d'un problème. Avant de mettre en œuvre des méthodes compliquées pour mesurer la concentration des polluants; il faut évaluer la nature et l'ampleur du problème. Nombre de polluants sont invisibles et inodores; et certains d'entre eux peuvent être très dangereux. Néanmoins, lorsqu'il s'agit de déterminer l'existence éventuelle d'un problème; il peut être utile de faire une enquête minutieuse sur les sources locales et notamment d'étudier l'utilisation de combustible et ses effets probables, d'inspecter les bâtiments et les cultures; d'observer tout ce qui ressemble à des fumées et aussi de se servir du sens de l'odorat. Toutefois, de cette façon, on n'est pas toujours sûr qu'il n'y a pas de problème de pollution, non seulement parce que certains polluants ne sont pas discernables par la vue ou l'odorat; mais encore parce que les concentrations et les réactions peuvent être influencées par des conditions météorologiques inhabituelles qui ne sont pas réunies au cours de l'évaluation préliminaire. A ce premier stade de l'enquête, le degré de concentration d'un polluant simple et facilement mesurable peut souvent être considéré comme un indicateur des quantités de quelque autre polluant dont le dosage est plus difficile ou plus onéreux à effectuer; c'est ainsi que si le polluant principal est la fumée de charbon, son évaluation peut donner une indication approximative du degré de concentration des hydrocarbures polycycliques.

c) Identification des sources de polluants. Il se peut qu'on doive, notamment mesurer les concentrations de certains polluants afin d'identifier avec certitude les sources de pollution. Cela est parfois difficile; par exemple; il n'est pas aisé de distinguer entre le rôle de la combustion du charbon et celui des véhicules automobiles. En l'occurrence, les deux sources peuvent dégager des hydrocarbures polycycliques et de l'oxyde de carbone, et il faut veiller à choisir, comme indicateur de mesure, des polluants dégagés par une seule source, par exemple en calculant les rapports de concentration de certains hydrocarbures qui permettent d'en identifier la source.

d) Evaluation des effets sur la santé. Dans diverses parties du monde, les autorités sanitaires mesurent la pollution atmosphérique pour évaluer l'ampleur de leurs difficultés par rapport à celles que connaissent d'autres régions. A cette fin, on peut créer un réseau de stations d'échantillonnage et faire des observations à intervalles fixes pendant de longues périodes. Dans le cadre de certaines études, on prélève par intermittence des échantillons dans différents emplacements selon un schéma statistique prédéterminé; mais quelle que soit la méthode adoptée, elle doit permettre de déterminer en gros quels sont les endroits de la région étudiée où la population est exposée aux polluants, et de mettre en évidence les variations qui se produisent selon les saisons et les conditions atmosphériques.

Les valeurs maximales peuvent être plus significatives que les concentrations moyennes, particulièrement lorsqu'on étudie les effets aigus de la pollution; à cette fin, il faut procéder à des observations pendant vingt-quatre heures au plus, et il peut être utile de faire des enregistrements continus ou horaires. Dans les études sur l'évolution des maladies chroniques et les effets à longue haleine, il faut en outre mesurer les concentrations moyennes à long terme de la pollution. On a parfois utilisé une méthode d'échantillonnage relativement simple, qui permet des prélèvements continus pendant un mois ou plus.

Ordinairement, pour évaluer l'exposition des individus ou des groupes de population à des polluants déterminés, on se fonde sur les résultats obtenus au moyen d'appareils fixes de prise d'échantillons disposés dans les endroits

où les gens vivent ou travaillent. Ce procédé donne généralement des résultats satisfaisants en milieu urbain, où les concentrations de polluants ne subissent pas de fluctuations très rapides dans le temps et l'espace, mais dans certains cas il faut recourir à des appareils "personnels" pour bien mesurer l'exposition des individus, notamment dans leurs foyers.

Il faut reconnaître que la santé peut être indirectement compromise lorsque l'individu est atteint dans son bien-être. Par exemple, des particules suffisamment grosses pour se déposer rapidement mais trop grosses pour être respirées et entraîner des affections pulmonaires peuvent souiller les tissus, les bâtiments et les peintures et affecter ainsi indirectement la santé en causant un désagrément; les mauvaises odeurs et l'irritation des yeux ne provoqueront peut-être pas de modifications pathologiques démontrables, mais elles auront de sérieux effets sur le bien-être.

e) Evaluation du rapport temps-pollution. Il peut être nécessaire de procéder à des mesures fréquentes et généralisées de la pollution pour évaluer les effets des conditions atmosphériques sur la dispersion des polluants ou les interactions chimiques de divers contaminants. Les exemples les plus connus de ce genre de problème sont probablement la pollution photochimique de Los Angeles et le brouillard pollué par les fumées qu'on rencontre en Angleterre. Dans les deux cas, les réactions qui se produisent entre les polluants dépendent beaucoup des facteurs météorologiques, et seule une mesure minutieuse peut permettre de préciser les mécanismes de formation des polluants secondaires.

f) Evaluation des effets des mesures de contrôle. Dans de nombreuses régions du monde, la pollution atmosphérique est considérée comme un fléau intolérable et l'on a pris des mesures pour la combattre. De toute évidence, on ne peut évaluer l'effet des règlements relatifs à la pureté de l'air qu'en étudiant les résultats de mesures effectuées systématiquement pendant une longue période et en de nombreux endroits. Trop souvent, on procède à de courtes séries de mesures pour évaluer ces effets, comme la pollution dépend fréquemment des variations météorologiques, il faut éviter les conclusions erronées, fondées sur une interprétation hâtive de courtes séries de mesures.

g) Utilisation des mesures de la pollution aux fins de la planification et du développement économique. Si l'on veut prévenir plutôt que combattre la pollution atmosphérique, il faut établir des plans de manière que les centrales électriques, les installations industrielles et les sources domestiques de pollution ne "surchargent" pas l'air. Dans bien des pays, on étudie soigneusement les concentrations de polluants avant d'aménager une région à des fins industrielles ou d'en faire un centre à forte densité de population. Cette pratique est fort louable, et en reconnaissant l'importance que revêt la pollution atmosphérique en urbanisme, on prévient de nombreux problèmes de pollution.

h) Etablissement de critères ou de directives pour la qualité de l'air. La population souhaite parfois que les autorités sanitaires définissent ce qu'elles estiment être des concentrations tolérables ou intolérables de polluants et qu'elles élaborent des règlements portant interdiction de dépasser certains seuils. L'OMS s'efforce d'établir des critères et des directives de ce genre, d'après les recommandations formulées par son Comité d'experts pour l'étude des polluants atmosphériques^{1/}. Il est évident qu'à cet effet, on a besoin d'effectuer fréquemment des mesures généralisées des divers polluants et de leurs combinaisons.

i) Mesure de la pollution aux fins de la recherche. La pollution est rarement - pour ne pas dire jamais - un phénomène simple; les composés réagissent souvent dans l'atmosphère après leur émission. La structure et la dimension des particules et gouttelettes peut être complexe et varier selon la température et le degré d'humidité. Les recherches en la matière en sont à leurs débuts, et il faudra faire de nombreuses mesures, concernant divers polluants, pour étudier l'évolution de la pollution.

Principes et procédés d'échantillonnage

En ce qui concerne la pollution atmosphérique, on entend par "échantillonnage" le prélèvement d'un certain volume d'air ou d'une certaine quantité d'un ou de plusieurs polluants aux fins de déterminer la concentration des polluants dans l'atmosphère.

^{1/} Organisation mondiale de la santé, collections Rapports techniques, 1963, 271.

L'échantillonnage précède généralement l'analyse, et un certain intervalle peut s'écouler entre les deux opérations. Toutefois, lorsqu'on désire entreprendre une étude sur la pollution atmosphérique et qu'on a décidé qu'elle devrait porter exclusivement sur des polluants bien déterminés, il y a lieu de dresser une liste des méthodes d'analyse utilisables ainsi que des méthodes d'échantillonnage correspondantes. En recourant aux méthodes d'analyse et d'échantillonnage qui sont adaptées aux besoins d'une étude, on jette les bases d'un choix définitif.

a) Principes présidant au choix d'une méthode d'échantillonnage. Le choix d'une technique dépend de plusieurs facteurs : objet des mesures, type d'effet auquel on s'intéresse, période à retenir pour établir une moyenne, et méthode d'enregistrement des résultats. Les limites imposées par la sensibilité et la spécificité des techniques d'analyse influent également sur le choix d'une technique d'échantillonnage.

Il importe de disposer d'une méthode d'échantillonnage simple et d'un appareillage robuste, bon marché, portatif et de faible encombrement et qui, de préférence, n'exige pas de source d'énergie ou point d'échantillonnage tout en fournissant le plus de données possible.

Enfin, il ne faut pas oublier que la méthode d'échantillonnage doit être efficace, c'est-à-dire qu'elle doit obvier à toute perte de polluant au moment du prélèvement et à toutes transformations ultérieures dues à des réactions entre polluants antagonistes ou à la disparition d'un polluant par suite d'un processus d'adsorption, de volatilisation, d'agglomération ou d'éclatement des particules. Elle doit fournir un échantillon représentatif de l'air respiré au point d'échantillonnage.

b) Procédés d'échantillonnage. En ce qui concerne la durée de la période d'échantillonnage, deux techniques sont actuellement employées : a) l'échantillonnage de courte durée et b) l'échantillonnage continu, pour la mesure des concentrations maximales et moyennes à des intervalles donnés. Les échantillons recueillis suivant la première technique sont généralement prélevés à des fins déterminées pendant une durée allant de moins de 30 minutes à plusieurs heures. Ils n'ont qu'une valeur limitée, sauf lorsque les concentrations ne subissent,

à certains moments de la journée, que des modifications mineures, dues par exemple, à la densité de la circulation, ou lorsque l'on veut contrôler la pollution par sondage en plusieurs endroits. D'une manière générale, les niveaux de pollution varient considérablement selon les conditions météorologiques, et ils dépendent de la topographie, des débits d'émission massive, de la température, de la vitesse et de la densité des gaz de cheminée, de la hauteur des cheminées, de la localisation des sources et de la distance par rapport aux sources situées du côté d'où vient le vent. Il est donc évident que l'on ne peut recourir à la première technique pour définir pleinement la nature et l'ampleur d'un problème de pollution atmosphérique. La détermination des concentrations maximales d'un polluant sur une courte période de temps est limitée par la constante temps de l'appareil d'échantillonnage ou de l'instrument d'enregistrement continu.

D'une manière générale, les études systématiques sur la nature et le degré de pollution de l'air ambiant, dont l'objet est d'obtenir les données nécessaires aux études épidémiologiques, d'évaluer les dangers éventuels que la pollution représente pour l'homme, la faune ou la flore et d'établir des programmes de lutte, exigent l'application de techniques d'échantillonnage continu. Suivant la durée du cycle d'échantillonnage, on peut lire ou calculer les concentrations maximales et moyennes enregistrées pendant des périodes déterminées. Dans un cycle donné, on peut également déterminer les concentrations maximales pour des périodes relativement courtes. Toutefois, les techniques d'échantillonnage aux instruments peuvent manquer de spécificité et, dans ce cas, il faut vérifier fréquemment les données, soit par étalonnage, soit par d'autres méthodes d'analyse plus spécifiques. Dans les cas où l'on ne peut utiliser des instruments automatiques à fonctionnement continu, on peut toujours, au moyen d'une méthode convenable d'absorption chimique ou de filtrage de volumes d'air déterminés, procéder au prélèvement continu de séries d'échantillons que l'on analyse ensuite.

Aux fins de la comparaison internationale des mesures courantes d'échantillons, on recommande de normaliser la période de prélèvement; ainsi, on entendrait par

prélèvement de courte durée celui qui serait effectué en 30 minutes, et par prélèvement de longue durée celui qui serait fait en 24 heures.

Les propriétés physiques et chimiques des polluants influent souvent sur le choix de la technique. C'est ainsi que, dans le cas des polluants gazeux, les échantillons peuvent être recueillis dans des récipients en verre ou en métal dans lesquels on a préalablement créé le vide, ou dans des sacs en matière plastique gonflés au moyen d'une pompe à main ou d'une pompe électro-mécanique à membrane; on peut aussi soit aspirer l'air dans un condenseur réfrigérant qui permet la rétention des polluants gazeux à point d'ébullition élevé; soit dissoudre les polluants dans une solution convenable; soit les transformer au moyen d'un réactif liquide approprié, et si possible sélectif, en un mélange plus facile à doser ou à détecter par colorimétrie; soit procéder par adsorption sur un adsorbant solide bien choisi, éventuellement à basse température, le polluant étant libéré par traitement ultérieur; soit utiliser un réactif solide étendu sur une surface inerte dans une éprouvette ou sur un papier filtre. Dans ce dernier cas, le réactif choisi doit être tel que le polluant à identifier provoque une modification de la coloration que l'on peut mesurer directement.

Pour les polluants liquides ou solides, on peut employer les méthodes suivantes : l'aspiration à travers un filtre de porosité connue, qui retient les matières ordinaires et radioactives en suspension; l'impact de particules lancées à grande vitesse contre une paroi solide, en présence ou en l'absence d'un liquide; l'emploi de séparateurs à force centrifuge qui permettent de retenir les matières en suspension de diamètre relativement grand, opération éventuellement suivie d'un filtrage destiné à séparer les petites particules que le cyclone n'a pas arrêtées; et la précipitation par procédé thermique ou électrostatique.

Ces divers procédés ont leurs avantages et leurs inconvénients, ce qui doit également influencer sur le choix de la technique d'échantillonnage.

Les méthodes d'échantillonnage à analyse directe exigent un matériel généralement coûteux qu'on ne peut installer qu'en un seul endroit. Aussi, ne peut-on multiplier le nombre de points d'échantillonnage sans augmenter les besoins de matériel, et donc les coûts. Par contre, l'analyse directe permet de

déterminer la courbe quotidienne de pollution en un endroit donné. La méthode est particulièrement utile lorsqu'on peut dégager, soit directement, soit par intégration, des moyennes successives à des intervalles donnés.

Les méthodes d'échantillonnage à analyse différée présentent un avantage : on peut maintenir sous surveillance un grand nombre de points d'échantillonnage avec une seule installation coûteuse d'analyse. Par contre, l'échantillonnage est à peu près instantané à chaque endroit, ce qui exclut la possibilité d'établir des moyennes par rapport au temps telles qu'on les a définies plus haut. En outre, comme il faut surveiller un grand nombre de points d'échantillonnage, on est obligé de diviser en zones la région intéressée et de prévoir au mieux de quelle manière et à quel moment s'opérera le contrôle de chacun des points choisis dans ces zones.

Mesure de la pollution atmosphérique

Nomenclature de la pollution atmosphérique. Un Comité d'experts de l'OMS sur les polluants atmosphériques^{1/} a souligné la nécessité de s'entendre sur l'utilisation de termes bien définis et précis pour décrire les phénomènes liés à la pollution de l'air dans différentes parties du monde. Actuellement, il y a une certaine confusion du fait qu'on emploie, dans les ouvrages spécialisés, des termes imprécis tels que "smog", "smaze", etc., pour décrire la nature, l'origine et la composition des polluants et l'influence de facteurs atmosphériques ou météorologiques connexes.

Unités. L'échange des résultats des études sur la qualité de l'air serait facilité si l'on adoptait à l'échelon international une nomenclature commune des unités cohérentes et des méthodes uniformes. Ce problème a été rapidement examiné en 1963 lors du Colloque interrégional sur les critères de la qualité de l'air et les méthodes de mesure. Le Guide pour le choix de méthodes de mesure des polluants atmosphériques (voir bibliographie) recommande un certain nombre d'unités pour exprimer les résultats de l'échantillonnage et de l'analyse de contaminants solides et gazeux et de facteurs connexes du milieu.

^{1/} Organisation mondiale de la santé, collection Rapports techniques, 1963, 271.

Tableau I

Unités recommandées pour l'échantillonnage et l'analyse de l'air

Rubrique	Unités recommandées	Unités de remplacement ou unités dérivées	Symbole
Particules en suspension	Milligrammes par mètre cube	Microgrammes par mètre cube	mg/m ³ μg/m ³
Gaz ou vapeurs	Milligrammes par mètre cube a/	Microgrammes par mètre cube ppm (parts par million) par volume	mg/m ³ μg/m ³ ppm
Volumes de gaz	Mètre cube dans des conditions types b/		m ³
Débits d'émission	Mètres cubes par seconde		m ³ /sec
Vitesse	Mètres par seconde		m/sec
Débits d'échantillonnage de l'air	Mètres cubes ou centimètres cubes par seconde	Litres par minute	m ³ /sec cm ³ /sec l/min
Température	Degrés centigrades		°C
Heure	00.00 à 24.00 heures		hr
Pression	Millibars	mm de Hg ^{c/}	mb mm Hg
Visibilité	Kilomètres	Mètres	km m
Lumière : Transmission Réflectance	Transmittance (en %) Réflectance (en %)		% T % R
Dimension des particules	Micron (10 ⁻⁶ m)	Micromètre	μ μm
Longueur d'onde de la lumière	Millimicrons (10 ⁻⁹ m) = nanomètre	Angström (10 ⁻¹⁰ m)	mμ Å nm

a/ Pour les substances de poids moléculaire connu, on peut convertir le ppm par volume en mg/m³, en le multipliant par poids moléculaire.

22,4

b/ On entend par conditions types une température de 0° C et une pression type de 1 013,25 millibars (760 mm Hg).

c/ mm de Hg x 1,3332 = millibars à température type de 0° C.

/...

Le système kilogramme-mètre-seconde-ampère devrait être employé pour exprimer les résultats des mesures de la pollution atmosphérique. La concentration des polluants exprimée en unités de ce système devrait être enregistrée comme masse par unité de volume à une température et à une pression types ou de référence. On s'accorde à préconiser l'emploi de la pression type de 1 013,25 millibars (760 mm Hg) et de la température de 0 °C. Si, dans de nombreux cas, il n'est pas justifié, pour les besoins locaux, de ramener les données aux grandeurs types ou de référence, du fait des erreurs inévitables ou du manque de précision des mesures, il est indispensable que la température et la pression soient enregistrées pour toutes les mesures impliquant des études comparatives ou précises. Normalement, la concentration des polluants atmosphériques, selon ce système, devrait être exprimée en milligrammes par mètre cube.

Certaines substances se rencontrent dans l'atmosphère en concentrations tellement faibles que l'unité de concentration recommandée (mg/m^3) est au moins 1 000 fois plus grande que la masse de polluants réellement présents dans un mètre cube d'air. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques et les substances analogues, potentiellement cancérogènes, ainsi que certains composés fortement toxiques, entrent dans cette catégorie. Dans ces cas, le degré de concentration peut être exprimé en microgrammes (μg), nanogrammes (ng) ou picogrammes (pg) par mètre cube.

En utilisant les unités recommandées au tableau I, on faciliterait considérablement le classement des résultats de l'échantillonnage et de l'analyse de l'air et l'utilisation des données à des fins de comparaison. On notera que pour plusieurs rubriques figurant dans ce tableau, on indique des unités de remplacement, ou dérivées, en même temps que les unités recommandées. On peut ainsi faire un choix pour enregistrer commodément les données, en évitant en particulier l'emploi des décimales, d'un maniement peu aisé.

Méthodes d'analyse

Dans le rapport intitulé Guide pour le choix de méthodes de mesure des polluants atmosphériques (voir bibliographie), on examine en détail nombre de méthodes d'analyse d'emploi courant. Toutefois, il faut poursuivre les recherches dans ce domaine.

a) Généralités. Les méthodes d'analyse pour la mesure de la pollution atmosphérique vont de techniques chimiques très simples aux procédés très complexes faisant appel à des instruments perfectionnés. Le type et le nombre des analyses nécessaires dépendent des objectifs de l'étude. Une analyse simple de type courant peut être répétée des milliers de fois et exiger de nombreuses heures de travail. Par contre, l'analyse d'un seul échantillon peut exiger les efforts d'une équipe de chercheurs pendant des jours ou des semaines.

b) Méthodes simples. Un des objectifs des recherches sur la mise au point de méthodes d'analyse est de simplifier les techniques, non seulement pour gagner du temps, mais également pour permettre à du personnel aux compétences très diverses, allant du collaborateur bénévole au chimiste qualifié, d'opérer dans de nombreux endroits, tant sur le terrain qu'en laboratoire. Les méthodes simples sont particulièrement souhaitables pour les polluants communs qui font l'objet de mesures courantes dans le cadre d'un réseau ou sur une longue période.

c) Méthodes faisant appel à des appareils sensibles. Beaucoup de méthodes d'usage courant ou susceptibles d'être utilisées pour l'étude de la pollution atmosphérique, en particulier en hygiène industrielle, n'assurent pas une sensibilité suffisante. Pour remédier à ce défaut, il arrive qu'on doive faire appel à un matériel d'échantillonnage plus perfectionné ou consacrer plus de temps aux analyses en laboratoire, avec emploi de matériel supplémentaire. Si la sensibilité (capacité de détecter de faibles quantités) est très importante dans l'étude de la pollution atmosphérique, la haute précision (capacité de distinguer entre deux mesures d'un ordre de grandeur à peu près équivalent) ne l'est pas toujours. D'une manière générale, une précision de l'ordre de plus ou moins 20 p. 100 est suffisante. A l'heure actuelle, on manque de méthodes à la fois simples et assurant la sensibilité voulue, notamment pour l'usage sur le terrain. Pour les études plus complexes, comme par exemple la détermination des ions ou des composés par ordre de grandeur, notamment dans la gamme des grandeurs inférieures au micron, les considérations de sensibilité sont prépondérantes.

d) Méthodes spécifiques. Les polluants atmosphériques qui nous intéressent se rencontrent généralement en faible quantité dans l'air, souvent en combinaison avec d'autres substances. Ces dernières posent des problèmes si elles gênent l'application des techniques d'analyse utilisées pour un polluant présentant un intérêt particulier. Nombre de méthodes d'analyse n'ont pas été étudiées suffisamment en détail pour qu'on puisse identifier la nature et l'ampleur des interférences dans diverses atmosphères polluées et pour qu'on sache y remédier ou en tenir compte.

e) Polluants organiques. De nouvelles substances dégagées par les usines chimiques et métallurgiques polluent l'atmosphère. L'étude des effets des nouveaux polluants organiques serait facilitée par la mise au point de méthodes spécifiques faisant appel à des appareils sensibles, qui permettraient d'identifier et de mesurer ces polluants. Cela pourrait exiger des efforts et des dépenses considérables.

f) Rapports gaz - aérosols. Le rôle que peuvent jouer les particules en suspension pour "potentialiser" les effets des gaz sur le système respiratoire doit encore être examiné et précisé. Les techniques actuelles ne sauraient permettre de comprendre les rapports absorption/adsorption entre les polluants gazeux communs et les particules polluantes et leur diffusion ultérieure dans le système respiratoire. La solution de ce problème peut exiger le recours à des techniques physiques et des méthodes d'analyse chimique très évoluées.

g) Chimie du cycle du soufre. La chimie du cycle du soufre dans l'atmosphère présente un grand intérêt, étant donné que les sulfates peuvent potentialiser les effets de l'anhydride sulfureux. Il faudrait trouver le moyen de déterminer le sort des composés du soufre dans l'atmosphère, notamment dans le cas de la conversion anhydride sulfureux/anhydride sulfurique/sulfates. Parmi les autres composés du soufre présentant un intérêt, on citera les sulfures inorganiques et organiques, les mercaptans, les sulfites, etc.

h) Photochimie. Les gaz dégagés par les automobiles ou provenant de la combustion d'autres combustibles fossiles sont deux sources importantes de pollution atmosphérique. Pour mieux connaître les effets de ces polluants, il faudrait s'efforcer de définir avec plus de précision les réactions photochimiques

atmosphériques mettant en cause des composés organiques. La mise au point de méthodes d'analyse doit s'inscrire dans le cadre de ces études.

i) Indicateurs pour la recherche météorologique. Le manque d'indicateurs non toxiques, restant stables dans les conditions normales de température, d'humidité, de rayonnement solaire et de précipitations qu'on observe dans l'air ambiant, limite l'utilisation d'indicateurs dans des études sur la circulation atmosphérique, notamment sur de longues distances et pendant de longues périodes. Très prometteurs à cet égard sont les composés polaires, dont des traces infimes peuvent être détectées grâce à certaines techniques d'analyse comme la chromatographie en phase gazeuse et liquide, avec détection de capture électronique.

j) Progrès récent de la chimie analytique. Grâce aux progrès de la chimie analytique, les dix dernières années, les mesures de la pollution atmosphérique ont pu atteindre un degré exceptionnel de sensibilité et de spécificité. De plus en plus, la spectrophotométrie, la spectrométrie infrarouge, la coulométrie, la chromatographie en phase gazeuse et liquide, etc., sont venues ajouter aux méthodes gravimétriques et dosimétriques. Ces nouvelles méthodes sont déjà largement utilisées, et cependant, dans tous les ouvrages courants de référence consacrés à la pollution atmosphérique, on se contente de mentionner brièvement les méthodes spectrophotométriques, et l'on ne parle pour ainsi dire pas des autres. Il importe que les études sur la pollution atmosphérique fassent appel aux meilleures méthodes d'analyse disponibles et qu'on veille tout particulièrement à la pureté des réactifs utilisés. La simplicité, la sensibilité, la fiabilité et la rentabilité de nombre de méthodes nouvelles devraient permettre de faire progresser sensiblement l'étude de la pollution atmosphérique. Il convient de reconnaître que le coût élevé de certains appareils nouveaux est justifié par les résultats obtenus et par les économies de main-d'oeuvre qu'ils permettent de réaliser.

Grâce à la chromatographie, notamment en phase gazeuse et liquide, on peut maintenant identifier et déterminer les polluants organiques avec un très haut degré d'efficacité. Assez récemment encore, on ne pouvait déterminer qu'un nombre restreint de composés organiques. On pouvait mesurer les taux d'hydrocarbure sans opérer de discrimination. Grâce à la chromatographie en phase gazeuse et liquide, les éléments constitutifs de mélanges complexes de composés organiques gazeux peuvent être séparés et les divers éléments constitutifs identifiés et déterminés. Au moyen de la chromatographie, avec température programmée notamment, on peut analyser les particules organiques de poids moléculaire élevé. La spectrophotométrie infrarouge, précédée ou non d'une séparation chromatographique, s'est révélée utile pour l'étude de certains problèmes de pollution atmosphérique. Les méthodes à l'infrarouge peuvent être appliquées non seulement pour l'identification et le dosage des polluants organiques aux fins de la recherche, mais également dans des systèmes de détection, par exemple de l'oxyde de carbone.

Dans certains cas, on peut utiliser la chromatographie par couche mince, la spectrométrie de masse, la fluorimétrie, la phosphorimétrie et la polarographie pour l'étude de la pollution atmosphérique. Actuellement, ces techniques ne sont appliquées qu'occasionnellement pour des mesures courantes, mais elles sont importantes en tant qu'instruments de recherche pour l'étude de certains problèmes. C'est ainsi qu'il peut être difficile d'analyser par la seule chromatographie en phase gazeuse et liquide des mélanges complexes d'hydrocarbures. Dans ce cas, en un premier temps au cours duquel on procédera à des séparations préliminaires, on peut faire appel à la chromatographie par couche mince; les éléments ainsi séparés peuvent être ensuite injectés dans un chromatographe à gaz qui procédera à la séparation finale, à l'identification et au dosage. De même, on peut recourir à la spectrométrie de masse pour identifier des matières qui ont été séparées par chromatographie. On fait souvent appel à la fluorimétrie, notamment pour des observations spéciales effectuées à très basse température. La phosphorimétrie constitue aussi un outil précieux d'identification et de détermination lorsqu'on ne dispose que de très faibles quantités de matières.

L'étude des polluants inorganiques est maintenant facilitée par des techniques nouvelles, et notamment de nouveaux réactifs et de nouveaux instruments. Une des plus anciennes méthodes d'analyse, la photométrie à flamme, est maintenant plus largement utilisée qu'auparavant parce qu'on dispose de nouveaux moyens d'excitation. A l'origine, les photomètres à flamme n'étaient utilisés que pour déterminer la présence de métaux alcalins ou de terres rares alcalines. Grâce au perfectionnement des méthodes d'excitation, on a pu employer la photométrie pour d'autres déterminations, telles que le dosage du magnésium, du zinc et du plomb. Cette technique est remarquablement sensible et tout à fait sûre, notamment lorsque les effets d'interférence ne sont pas considérables.

L'introduction récente de la spectroscopie par absorption atomique revêt une importance particulière. D'une manière générale, cette technique assure une sensibilité au moins égale à celle de la photométrie à flamme ou de la spectroscopie par émission. Chose plus importante encore, la spectroscopie par absorption atomique est spécifique en soi. La technique est simple et le coût du matériel relativement peu élevé, du moins quand on le compare au coût de la spectroscopie par émission. L'absorption de l'énergie de rayonnement par des atomes à l'état fondamental est un moyen d'identification comparable à l'émission d'énergie de rayonnement par des atomes à l'état excité. L'absorption permet de doser quantitativement des quantités infimes de métaux.

Grâce à la mise au point récente de réactifs ou de réactions spécifiques, sélectifs et sensibles, on peut détecter et déterminer de nombreuses substances qui présentent un intérêt pour l'étude de la pollution atmosphérique. La grande sensibilité résultant de l'emploi de nombre de réactions permet des dosages de l'ordre du microgramme et du nanogramme. Des réactions spécifiques ou très sélectives donnent la possibilité de mesurer directement les polluants, sans qu'on ait besoin, la plupart du temps, de se préoccuper des interférences éventuelles. Heureusement, il est maintenant facile de se procurer le matériel spectrophotométrique nécessaire à la réalisation de bon nombre de ces expériences.

La méthode du four annulaire, récemment mise au point, présente certains avantages par rapport aux techniques spectrophotométriques, notamment pour l'analyse d'échantillons relativement petits et prélevés pendant un temps très court. Le four annulaire est un appareil simple et bon marché qui permet la séparation, la

concentration et l'utilisation de moyens chimiques pour la détection et le dosage de diverses substances de l'ordre du microgramme et du nanogramme. Cette méthode offre d'excellentes perspectives pour l'étude des particules transportées par l'air, car elle permet une grande sensibilité; de plus, elle est sûre et commode. On peut obtenir des résultats faisant apparaître des erreurs relatives de l'ordre de 5 à 10 p. 100 au plus, généralement acceptables lorsqu'il s'agit de dosages de l'ordre du microgramme. On dispose déjà de méthodes spécifiques pour la détermination de l'aluminium, du **beryllium**, du nickel, du cuivre, du fer, du zinc, du plomb, du cadmium, du vanadium, de l'antimoine, du sélénium, des phosphates et des sulfates. On met au point d'autres méthodes.

k) Méthodes diverses. L'activation des neutrons est une méthode à laquelle on a parfois recours lorsqu'il s'agit d'étudier des quantités extrêmement minimes de matière. Cette technique assure une très grande sensibilité et une très grande fiabilité, et elle est parfois la seule qui soit utilisable.

La spectrométrie par rayons X peut fournir des renseignements spéciaux et être utilisée pour compléter les études microscopiques. Les méthodes par microsonde sont particulièrement intéressantes pour étudier les particules transportées par l'air dans des cas déterminés. Elles exigent des techniciens hautement compétents et un matériel très onéreux. Ces observations sont également valables pour la microscopie électronique, utile pour l'étude de problèmes particuliers.

Certaines méthodes électrochimiques trouvent des applications spéciales en matière de pollution atmosphérique. On peut faire appel au dosage coulométrique lorsque des méthodes très sensibles et très précises s'imposent. Ces méthodes sont particulièrement intéressantes pour la détection continue des polluants atmosphériques.

Depuis peu, on dispose d'instruments automatiques suffisamment sensibles pour les mesures atmosphériques. Ils sont fondés sur des principes bien établis (colorimétrie, conductivité, déclin de la fluorescence et spectroscopie par absorption).

Les effets biologiques en tant qu'indicateurs de pollution

Les systèmes d'indicateurs biologiques contribuent beaucoup à rendre compte de la nocivité de la pollution pour l'être humain. Les effets sur la végétation, par exemple les effets de l'anhydride sulfureux sur l'alfalfa ou les lichens, des fluorures sur les glaïeuls, ou de l'éthylène sur la fleur du plant de tomate, sont spécifiques et semi-quantitatifs; encore faudrait-il sans doute être pathologiste des plantes pour distinguer les effets de la pollution des effets des maladies végétales, des changements climatiques ou de l'état du sol. Grâce aux effets des polluants photochimiques de l'atmosphère sur le pâturin des prés (poa annua) et le haricot (phaseolus vulgaris), on a pu détecter et doser les niveaux d'ozone et de peroxyacétyl nitrate en mélange. En outre, les études biochimiques sur les plantes aident à examiner les effets des polluants sur la biochimie humaine.

Toutefois, l'homme est le principal indicateur biologique des dangers de la pollution atmosphérique, et en ce qui concerne au moins un polluant, l'oxyde de carbone, le corps humain agit en tant que préleveur intégrateur. Grâce à des taux raisonnablement bien définis d'absorption et d'excrétion, l'absorption directe de ce polluant dans le sang, à travers les poumons, permet d'utiliser la quantité d'oxyde de carbone se trouvant dans le sang des non-fumeurs comme indice du temps d'exposition au cours des quatre à huit heures précédentes et comme guide numérique du danger pour la santé. En mesurant avec précision la quantité d'oxyde de carbone dans l'air équilibré expiré par les personnes exposées, on peut déterminer directement et de façon simple le danger pour la santé, avec moins de difficulté que si la même mesure était effectuée dans l'air ambiant.

La dépression du taux de cholinestérase est un autre indicateur biologique valable de l'exposition de l'homme aux insecticides organiques au phosphore qui, parfois, deviennent des polluants généraux de l'atmosphère lorsqu'ils sont pulvérisés à partir d'un avion.

/...

Choix des dispositifs et des instruments

Il existe de nombreux dispositifs et instruments destinés à l'étude de la pollution atmosphérique. Ils vont du simple appareil servant à identifier un polluant jusqu'à des techniques et des instruments compliqués permettant la mesure quantitative de substances définies. Le choix de la méthode de mesure dépend du but recherché, comme on l'a indiqué, ainsi que de nombreuses considérations pratiques ayant trait aux disponibilités en personnel, en fonds et en services d'appui.

Nature du problème

Le matériel à utiliser sera en général déterminé par les exigences particulières de l'étude. Par exemple, des essais simples utilisant des papiers imprégnés ou des tubes détecteurs, ou même dans certains cas une simple inspection du lieu intéressé, peuvent suffire pour établir qu'un problème de pollution de l'air existe. Il faut choisir la méthode la plus simple et la plus économique qui convienne au travail envisagé, à moins qu'il n'existe des raisons précises d'agir autrement. Par contre, les recherches préliminaires peuvent faire ressortir la nécessité d'études supplémentaires allant de simples relevés à court terme jusqu'à des enquêtes étendues de longue durée. A mesure que la complexité des études augmente, le choix des dispositifs et des instruments utilisables se trouve limité par plusieurs considérations d'ordre général, résumées ci-dessous.

a) Coût. Les fonds disponibles limitent dans la plupart des cas l'importance des recherches. Il est impératif d'équilibrer les sommes affectées à l'achat de dispositifs et instruments de mesure et celles devant servir à l'analyse et l'interprétation des données. Il est arrivé trop souvent qu'une fraction excessive du budget ait été consacrée au rassemblement des données, de sorte que celles-ci n'ont jamais pu être interprétées, analysées ou enregistrées d'une façon satisfaisante. Dans la plupart des études, le montant des fonds disponibles imposera un compromis entre ce qui est souhaitable et ce qui est possible. Toutefois, aucun compromis ne devrait mettre en péril l'objectif fondamental du projet.

b) Disponibilités en matériel. Le fait que le matériel voulu soit immédiatement disponible est une considération importante dans le choix des appareils. Il

est préférable d'avoir des articles en stock, lorsqu'ils sont disponibles, surtout parce qu'il est facile de les entretenir et de les remplacer. Toutefois, dans certains cas, il peut être nécessaire de construire des appareils spécialement adaptés au travail envisagé.

c) Sensibilité et spécificité des besoins. Il est évident que l'on doit choisir un dispositif d'une sensibilité suffisante et se prêtant bien aux tâches prévues. D'autre part, on doit éviter de choisir un matériel plus sensible ou plus précis qu'il n'est nécessaire, non seulement parce que son prix est plus élevé, mais aussi parce qu'il peut exiger plus de soins et d'entretien.

d) Temps nécessaire à l'échantillonnage. La détermination du temps nécessaire à la prise d'échantillons est extrêmement importante et influe sur le coût de l'opération. En général, la méthode de mesure devrait fournir des données en rapport avec le temps nécessaire à l'échantillonnage. On ne devrait pas utiliser d'instruments automatiques lorsqu'un matériel plus simple est suffisant. Il est déraisonnable de choisir un matériel complexe lorsque ce n'est pas nécessaire, non seulement parce que les données obtenues ne seront jamais utilisées, mais aussi par suite du coût plus élevé de l'analyse des données qu'il fournit, ainsi que celui de l'étalonnage, de l'entretien et des réparations qu'il exige. Dans bien des cas, un poste d'observation unique muni d'instruments automatiques à enregistrement continu, relié à des postes secondaires extérieurs dotés de dispositifs peu compliqués, peut fournir plus de données sur la répartition et la variation des polluants que plusieurs postes automatiques d'un coût total identique ou supérieur.

e) Transmission des données. Dans certains cas, il peut être bon d'équiper les instruments automatiques de dispositifs permettant la transcription directe des chiffres ou le transfert sur bande en vue du traitement automatique de l'information. Toutefois, il est possible qu'un transfert sur bande ne soit indiqué que dans les cas où la durée des observations est très courte, par exemple inférieure à trente minutes. Il y a lieu de noter qu'il faut plusieurs étapes intermédiaires pour transférer des données de la bande enregistrée au programme d'analyse par ordinateur. En effet, il y a lieu de produire d'autres bandes qui tiennent compte de certains facteurs signalés dans le journal de l'opérateur, par exemple de l'omission de l'étalonnage, des périodes de fonctionnement défectueux de

l'instrument, des variations des caractéristiques de l'instrument, etc. Il faut vérifier la validité des données fournies par l'instrument, de préférence par des méthodes automatiques. La sécurité de fonctionnement des instruments automatiques et des systèmes de transfert des données est à présent telle que le transfert sur bande ne doit être ajouté que s'il est vraiment nécessaire.

f) Nécessités de l'entretien. Les instruments doivent être d'un fonctionnement suffisamment sûr pour travailler sans surveillance pendant de longues périodes. Il faut en l'occurrence tenir compte des disponibilités de personnel technique capable de desservir et d'entretenir le matériel. L'importance et la fréquence des étalonnages nécessaires peuvent aussi influencer le choix du matériel pour un travail donné.

g) Mobilité de l'appareillage, locaux et besoins en énergie. Dans certains cas, le choix du matériel est imposé par la nécessité d'utiliser le même instrument à plusieurs endroits différents; sa mobilité devient alors la considération dominante. Il faut aussi disposer de locaux et d'une source stable d'énergie.

Instruments destinés à l'échantillonnage des poussières

En plus des exigences générales mentionnées ci-dessus, le choix du matériel destiné à l'échantillonnage et à l'analyse de la pollution due à des poussières est influencé par le genre de la tâche à accomplir. Le matériel d'échantillonnage peut être très simple ou très compliqué, et les techniques d'analyse sont aussi d'une complexité variable. On pourrait classer comme suit les divers types d'échantillonnage et ceux des analyses qui les complètent :

a) Poussières en suspension. Les poussières suffisamment fines pour rester en suspension dans l'air sont collectées par filtration, par impact, par précipitation électrostatique ou par précipitation thermique. Les analyses peuvent porter sur la salissure, la masse totale, la masse totale de composés chimiques définis, le comptage total, le comptage par fractions selon les dimensions ou la variation de la composition chimique selon les fourchettes granulométriques; d'autres répartitions peuvent être fondées sur des différences dans les propriétés physiques. La complexité du matériel d'échantillonnage va des simples dispositifs de filtration jusqu'aux appareils compliqués de classification granulométrique.

Les techniques analytiques vont de l'analyse gravimétrique destinée à estimer le poids total des poussières, jusqu'aux micro-procédés permettant d'identifier les constituants selon différentes classifications par dimension. Ces dernières méthodes sont particulièrement importantes lorsqu'il s'agit de particules d'une dimension inférieure au micron.

b) Dépôts de poussières. La poussière qui se dépose à partir de l'air et qui comprend en général des particules d'un diamètre supérieur à dix microns est collectée dans un récipient adéquat pendant des périodes prolongées, et des analyses permettent ensuite d'estimer le poids total ou le poids de quelques composants particuliers.

c) Emissions. Les poussières qui proviennent d'émissions peuvent être collectées à partir de systèmes de tuyaux ou de la cheminée, de préférence par une méthode "isocinétique", les techniques utilisées dépendant de la répartition des particules d'après leurs dimensions, de l'humidité et de la température.

Gaz et vapeurs

On peut recueillir des échantillons de gaz et de vapeurs provenant de l'atmosphère ou des sources étudiées en utilisant divers principes physiques ou chimiques. Les analyses peuvent déterminer la masse de composés définis ou celle de classes générales de composés. Les techniques analytiques utilisables vont des méthodes chimiques normales, **relativement** simples, jusqu'aux techniques modernes, par exemple les divers types de chromatographie; on peut aussi utiliser la chromatographie associée à d'autres méthodes, comme la spectrométrie de masse et les diverses analyses spectrophotométriques.

Dans l'identification et la détection des gaz et des vapeurs, il est particulièrement intéressant d'employer des dispositifs simples comme les indicateurs (éprouvettes ou papiers). Ces dispositifs sont surtout utiles pour une première évaluation du problème de la pollution atmosphérique, bien que l'on puisse aussi s'en servir dans de nombreux autres types de recherche.

Méthodes indirectes

L'analyse des polluants ou de leurs effets peut se faire en utilisant le rayonnement électromagnétique naturel ou artificiel, ou les techniques acoustiques:

Les méthodes de ce type vont de la simple évaluation de la densité des fumées, faisant appel au tableau de Ringelmann, jusqu'aux techniques perfectionnées qu'on étudie actuellement et qui se fondent sur des principes physiques découverts récemment ou sur l'amélioration de techniques physiques existantes. On trouve dans ce dernier groupe d'emploi du rayonnement passif infrarouge pour la mesure chimique semi-quantitative des constitutants des panaches de fumée, les sondages de température effectués à l'aide du rayonnement infrarouge de l'oxygène atmosphérique, la détermination de l'altitude d'une inversion au moyen de la rétro-diffusion d'un faisceau de laser ou de radar, etc. Ce genre d'analyse comprend aussi les mesures d'effets, comme la corrosion de panneaux-échantillons, la décoloration et la salissure des tissus.

Mesures météorologiques

Comme la météorologie a un effet important sur la pollution atmosphérique, on peut avoir besoin de matériel météorologique pour l'étude de ce phénomène.

Matériel auxiliaire

Pour étudier la pollution atmosphérique, il faut disposer de pompes, d'indicateurs de débit et aussi de locaux pour le matériel, de sources d'énergie et de systèmes de lecture des données. Il serait bon de normaliser ces appareils et de les produire en série.

Présentation des résultats

Pour effectuer une évaluation d'ordre général, il est bon d'indiquer la présence ou l'absence d'un polluant, sa quantité approximative dans les échantillons prélevés pendant des durées spécifiées, les conditions météorologiques et les emplacements étudiés. Les résultats immédiats peuvent ainsi être présentés sous la forme d'une liste des concentrations du polluant présentes dans les échantillons recueillis. Si l'on analyse une grande quantité d'échantillons, des tableaux, des histogrammes et des répartitions cumulatives de fréquence deviennent utiles.

Si l'on désire identifier les sources des polluants, les comptes rendus des résultats devraient permettre de déterminer sans difficulté le gradient dans le temps et dans l'espace entre la source et le lieu d'échantillonnage, dans des conditions météorologiques spécifiées, particulièrement en ce qui concerne la direction et la vitesse du vent. Tant que l'on satisfait à cette dernière exigence,

des chiffres moyens sont en général acceptables. Toutefois, si l'intensité de la source varie avec le temps, le moment où l'on a effectué l'échantillonnage acquiert une grande importance et devrait être mentionné.

Pour l'évaluation des effets sur la santé, les résultats peuvent être présentés de façons multiples et très variées. Comme on pense que dans le cas de certains polluants des expositions de courte durée peuvent entraîner des effets aigus sur la santé, il est bon d'avoir des moyennes horaires ou semi-horaires, ou d'effectuer des mesures continues. De telles mesures fournissent une quantité considérable de données dont l'interprétation dépend beaucoup des méthodes de présentation et de réduction des observations. Ce qu'on désire connaître en général, c'est le nombre d'événements, la durée de ces événements ou la fraction du temps de prélèvement pendant laquelle un niveau de pollution donné a été dépassé dans le cadre de tel ou tel plan de sondage. Par exemple : a) combien de fois par an (ou par mois) a-t-on dépassé $0,6 \text{ mg/m}^3$ de SO_2 ? b) pendant combien de temps cette valeur a-t-elle été dépassée une fois atteinte? c) pendant quelle fraction de la période de prélèvement a-t-elle été dépassée?

Dans le cas de certains polluants, comme l'oxyde de carbone, les effets sur les personnes résultent d'une exposition suffisamment prolongée pour provoquer une accumulation de ce composé dans le corps. Des moyennes établies pendant quatre ou huit heures sont alors particulièrement intéressantes, mais il est bon de préciser, comme ci-dessus, le nombre et la durée des événements et la fraction de la période d'échantillonnage pendant laquelle certains niveaux ont été dépassés. Enfin, lorsqu'il s'agit de certains polluants comme le plomb, seule l'exposition moyenne à long terme présente un intérêt médical. Pour l'évaluation d'autres effets, la présentation devrait varier selon la source et l'effet.

Pour évaluer l'efficacité des mesures de contrôle, dans le cas de sources étendues ou complexes, il est utile de déterminer les tendances à long terme en employant des méthodes se prêtant à répétition et en établissant des médianes ou des moyennes s'étendant sur plusieurs années; par contre, si la mesure contrôle une source ponctuelle, il faudra des comptes rendus comparant les observations avant et après le contrôle.

Pour évaluer les rapports entre les conditions météorologiques et la pollution, on choisira les méthodes de présentation d'après les hypothèses particulières que l'on cherche à vérifier, mais il sera souvent avantageux de disposer de modèles mathématiques ou de données choisies, et les moyennes à long terme deviendront inacceptables.

Lorsqu'on utilise l'enregistrement continu, on mentionne souvent les valeurs maximales sans faire ressortir l'influence de la durée du sondage, de la période de référence de l'instrument ou des conditions météorologiques ambiantes. Les maximaux ont aussi tendance à dissimuler les erreurs d'analyse ou de mesure, et c'est une raison de plus pour les rattacher, s'ils sont cités, à la fréquence de répartition.

Les méthodes de présentation suivantes sont à conseiller.

1. Pour une période donnée de sondage ou d'intégration, les résultats peuvent être groupés selon la fréquence de l'événement et représentés sur un graphique ou, mieux encore, un histogramme donnant le pourcentage des fréquences pour lesquelles une concentration donnée est atteinte ou dépassée.
2. Il est possible d'établir une série d'histogrammes stratifiés pour chaque lieu d'observation, pour la durée totale de l'étude ou pour des périodes déterminées (mois, semaine, chaque lundi ou chaque mardi, etc.); on peut aussi, lorsqu'il s'agit de la pollution par les gaz d'échappement des automobiles, dresser des histogrammes pour des heures successives de la journée, mais si l'on choisit une heure déterminée, l'ensemble des résultats pourrait porter, par exemple sur tous les lundis, tous les mardis ou tous les jours de la semaine.
3. Tout ce qui vient d'être dit au sujet des histogrammes s'applique aussi aux moyennes des résultats, car en plus de la moyenne générale de toutes les déterminations, on peut avoir des moyennes mensuelles, hebdomadaires, journalières et même horaires. Les grandeurs dont la moyenne est établie devraient être clairement spécifiées.
4. Dans chaque cas, il y a lieu de présenter les résultats de façon à en faciliter l'utilisation statistique; des graphiques ou des schémas sont souvent préférables à des tableaux ou à des chiffres.

5. Un autre aspect à retenir est l'établissement de cartes régionales de la pollution. Les principes mentionnés ci-dessus s'appliquent aux périodes de temps à envisager. En outre, on devrait essayer d'employer des lignes isotoxiques (lignes joignant des points d'égale pollution).
6. Partout où c'est possible, il est avantageux de faire ressortir la corrélation dans le temps et dans l'espace avec un polluant donné. On peut ainsi tracer des courbes représentant la concentration d'un polluant donné à la même échelle dans le temps que celles qui représentent les émissions d'une source de polluant ou la vitesse et la direction du vent.

La météorologie et la mesure de la pollution de l'air

La mesure de la pollution de l'air peut avoir divers objectifs. Toutefois, dans la plupart des cas, il est indiqué de se servir des données météorologiques afin de juger de la signification des résultats des mesures. Le nombre et le type de mesures météorologiques dépendront de l'objectif et de la complexité de l'étude et de la disponibilité des données et des instruments. Par l'intermédiaire des services météorologiques officiels, on disposera en général de données sur la température, l'humidité, la vitesse et la direction du vent et les précipitations. Les données sur les variations de la température avec l'altitude sont souvent fort utiles.

Il est important de mesurer la teneur en CO_2 qui se répercute sur l'équilibre thermique de l'atmosphère terrestre. Des observations sur certains polluants peuvent aider à comprendre les mouvements de l'atmosphère. Par ailleurs, il semble que la pollution de l'air entraîne une diminution de la visibilité. Il est peu probable; actuellement, qu'un brouillard épais puisse être causé uniquement par la présence de polluants, mais il est concevable que la mauvaise visibilité se prolonge en raison de leur action.

La pollution, particulièrement celle qui est due aux poussières, peut aussi faire obstacle au rayonnement solaire. Lorsque l'on examine les polluants pour d'autres raisons, par exemple en vue d'étudier leurs effets sur la santé, il y a lieu de prendre en considération les facteurs météorologiques, car ils influencent la concentration en polluants au même titre que les caractéristiques de la source polluante. Ainsi, la pollution et les facteurs météorologiques peuvent tous deux avoir des répercussions sur la santé.

Si l'on souhaite uniquement déterminer les divers polluants, on peut se passer de données météorologiques supplémentaires, mais celles-ci peuvent se révéler nécessaires pour l'interprétation du degré de contamination observé dans l'atmosphère.

Les principaux facteurs qui influent sur la concentration en polluants sont le vent (direction et vitesse) et la stabilité de l'atmosphère. En règle générale, il ne sera pas possible de mesurer la vitesse et la direction du vent à chacun des endroits où l'on mesure la pollution et il n'est pas toujours nécessaire de le faire. L'objectif recherché permettra de déterminer si l'on a besoin de telles données.

Si l'on veut tirer le parti maximum des données météorologiques, il faut que le temps de prélèvement de l'échantillon soit court (une ou deux heures). En général, il y a lieu d'être prudent lorsqu'on rapporte les moyennes ou les totaux de la concentration d'un polluant déterminé obtenus sur une longue période, un mois par exemple, aux données sur le vent, par exemple à la durée pendant laquelle le vent souffle dans une direction donnée. Il est possible que l'exposition à la pollution se produise surtout quand le vent prend une direction relativement inhabituelle pendant la période d'observation.

La stabilité de l'atmosphère peut varier avec la direction et la vitesse du vent. Les effets de la stabilité sont complexes et dépendent notamment de la répartition verticale des températures dans la couche intéressée. Des conditions stables ont tendance à supprimer les déplacements verticaux dans l'atmosphère, mais l'effet peut être différent suivant que les polluants proviennent de sources situées à haute altitude ou sont évacués dans l'atmosphère à basse altitude. Dans le premier cas (du moins tant qu'il y a un peu de vent), le polluant n'arrivera pas au sol, ou y arrivera rarement; dans le deuxième, il ne se diffusera pas vers le haut. Toutefois, pendant une stagnation atmosphérique prolongée (une semaine ou plus), on ne devrait pas négliger les effets du brassage journalier des polluants qui se trouvent sous une couche d'inversion élevée.

Il est difficile d'obtenir des données sûres concernant la stabilité des premiers 200 à 300 mètres de l'atmosphère. La meilleure façon d'y parvenir est de se servir de tours d'observation météorologique, mais celles-ci n'existent pas en quantité suffisante. Sur la terre ferme, la stabilité est maximale aux premières

heures du matin et minimale l'après-midi. Si l'on envisage d'effectuer des observations d'une durée de l'ordre d'une heure, il est donc fortement recommandé de ne pas toujours le faire au même moment de la journée, car on peut ainsi fausser les résultats de l'analyse. Des mesures continues ou répétées sont préférables pour démontrer la variation diurne des polluants. Parmi les facteurs météorologiques à retenir, il faut citer les précipitations qui peuvent avoir pour effet de nettoyer l'atmosphère, selon les dimensions des gouttelettes et les propriétés du polluant et le rayonnement solaire qui peut donner naissance à des réactions chimiques. Ce dernier phénomène relève plutôt de la chimie que de la météorologie, mais son existence même démontre qu'il n'est pas toujours possible de comparer les observations faites sur certains polluants à des latitudes et des altitudes différentes et en différentes saisons. Il peut alors être important de disposer aussi de données sur l'état nuageux.

L'humidité relative peut jouer un rôle, car certains polluants, par suite de leur teneur en électrolyte, peuvent gêner la visibilité, comme on l'a mentionné ci-dessus. La présence d'eau dans l'air, sous forme de gouttelettes de brouillard, facilite l'oxydation du gaz sulfureux qui devient de l'acide sulfurique.

C'est donc surtout lorsque les mesures météorologiques et les mesures de la pollution de l'air sont coordonnées qu'on arrive à des conclusions sûres. Là où c'est possible, une telle coordination devrait commencer dès le début des activités, en particulier lorsqu'on choisit l'emplacement des postes d'observation de manière que les données soient représentatives.

On doit envisager la mise au point ou l'évaluation de modèles mathématiques sur la diffusion des polluants provenant de sources isolées ponctuelles ainsi que de sources étendues, comme les villes. Il serait utile également d'étudier, au moyen de modèles mathématiques, les données relatives à l'influence de la topographie sur la diffusion des polluants.

Dangers de certains polluants atmosphériques pour l'homme

En plus des effets des concentrations élevées de polluants dans l'air urbain stagnant, les études épidémiologiques indiquent que des concentrations de polluants supérieures à la normale, mais bien inférieures à celles qui ont eu des conséquences

spectaculaires, ont des effets perceptibles et peut-être cumulatifs sur les personnes vulnérables. On a utilisé divers indices de mortalité et de morbidité, dont certains sont brièvement décrits ci-dessous, mais il paraît évident que les effets de la pollution subaiguë deviennent plus frappants lorsqu'on étudie un nombre considérable d'individus vulnérables. Jusqu'ici, les études exécutées au Royaume-Uni n'ont pas abouti à mettre en cause, spécifiquement et séparément, ni la fumée, ni le gaz sulfureux, polluants qui servent communément à mesurer les indices de pollution. L'application du Clean Air Act au Royaume-Uni entraîne heureusement une diminution de la pollution par les fumées. D'autres études, portant sur les réactions à la pollution qu'on pourrait enregistrer si la proportion fumées/gaz sulfureux était modifiée, permettraient peut-être d'évaluer séparément les rôles joués par ces deux polluants.

Il paraît démontré que deux maladies que l'on croit causées en partie par la pollution atmosphérique, la bronchite chronique et le cancer du poumon, sont étroitement liées à d'autres facteurs, particulièrement à l'habitude de fumer des cigarettes. Il importe d'étudier les "populations industrielles", groupes d'individus que leur profession expose à des concentrations élevées de polluants que l'on soupçonne de favoriser ces maladies. Les résultats vont souvent à l'encontre des hypothèses simples concernant les irritants ou les cancérogènes classiques.

Plusieurs études pilotes ont été effectuées, sous les auspices de l'OMS, sur la pollution dans des villes européennes (groupées deux par deux) et sur son influence sur le cancer du poumon. Les résultats montrent que cette technique onéreuse et de longue haleine n'a qu'une valeur limitée, surtout parce qu'il est impossible d'évaluer l'exposition antérieure. Si l'on fait des enquêtes sur le milieu urbain, on devrait les relier aux études épidémiologiques futures.

Des études épidémiologiques utilisant des méthodes comparables et portant sur des populations ayant des emplois similaires et vivant respectivement à Londres, dans la campagne anglaise, dans les villes orientales des Etats-Unis, à San Francisco et à Los Angeles, ont montré que la persistance de la toux et des expectorations est relativement commune dans toutes les villes étudiées et que l'habitude de fumer des cigarettes paraît en être la cause principale. Les essais sur la fonction

pulmonaire ont donné des valeurs presque identiques pour les villes des côtes orientales et occidentales des Etats-Unis, mais les valeurs ont été inférieures pour des groupes comparables de la campagne anglaise et plus réduites encore pour la population de Londres. Les cas de toux persistante et d'expectorations s'accompagnant d'essoufflement ou d'affections aiguës des voies respiratoires entraînant une incapacité étaient surtout fréquents à Londres; moins communs dans la campagne anglaise, c'est dans les villes des Etats-Unis qu'on les rencontrait le moins souvent. Leur fréquence est peut-être liée à la pollution de l'air.

De nombreux types de pollution atmosphérique donnent lieu à des odeurs désagréables, mais il faudra étudier la question plus avant pour établir les relations entre certaines substances ou combinaisons et la réaction des diverses populations.

L'irritation des yeux et des voies respiratoires est le principal symptôme de la pollution photochimique du type rencontré à Los Angeles. Les matières oxydantes de l'air joueraient un rôle à cet égard. Il n'est pas certain que ce phénomène se retrouve dans d'autres agglomérations. Ce genre de pollution paraît aggraver les symptômes chez certaines personnes atteintes de maladies respiratoires chroniques, mais il est difficile de mesurer ces effets.

On trouve assez communément dans l'atmosphère des grandes villes, où circulent beaucoup d'automobiles, une teneur en CO suffisamment élevée pour porter à 2 p. 100 le taux de carboxyhémoglobine dans le sang. On a démontré que ce taux gêne les fonctions psychomotrices, mais il conviendra de poursuivre l'étude du problème pour déterminer si cet effet peut influencer sur l'aptitude à conduire les automobiles.

On sait que l'ozone est mortel pour les animaux à une concentration de 6 ml par m³, chiffre qui n'est que six fois supérieur à la concentration maximale observée à Los Angeles. On a montré récemment, en expérimentant sur 11 sujets humains, qu'une exposition de deux heures à une concentration de 0,6 ml par m³ gênait la diffusion du gaz des alvéoles vers le sang. Il faudrait étudier la façon dont ces effets se produisent et, le cas échéant, les facteurs qui modifient la sensibilité des divers groupes de la population.

Certains polluants, comme le plomb, qui sont introduits dans le corps peuvent produire des effets toxiques ou autres selon la quantité absorbée. On n'a observé aucun effet nuisible dû au plomb présent dans l'air ambiant, mais la question devra être étudiée plus avant.

La pollution de l'atmosphère des usines par les produits chimiques organiques synthétiques et par les produits intermédiaires qui servent à les fabriquer n'est pas rare. L'étude des effets de cette pollution et la détermination des concentrations tolérables relèvent du toxicologue et de l'hygiéniste industriel. En dehors des usines, la contamination de l'air par les produits chimiques organiques synthétiques ne devrait avoir lieu qu'à l'occasion de l'utilisation de ces substances (traitement des végétaux, du sol, des surfaces extérieures des bâtiments, emmagasinage des **aliments**, emploi dans les ménages). Il est probable que les problèmes que pose ce type transitoire de pollution n'ont qu'une importance locale, et comme le produit chimique en cause est déjà identifié et ses propriétés connues, il est possible de prendre des précautions pour éviter de l'absorber.

La pollution de l'atmosphère ambiante par les produits chimiques organiques synthétiques est probablement insignifiante. (Il conviendrait d'examiner ce problème hypothétique compte tenu d'une contamination très réelle, à savoir celle que provoquent dans l'atmosphère urbaine les substances minérales "traditionnelles" et "récentes".) Il est douteux que les pesticides synthétiques (liquides ou en poudre) puissent facilement se disperser de façon à être aspirés, puisque leur composition et les méthodes employées pour leur application visent à les fixer au maximum sur les surfaces traitées. Il faudrait qu'un processus de dégradation intense intervienne pour qu'il s'en dégage des particules suffisamment fines pour être transportées à nouveau par l'air et être absorbées.

Les émissions de produits chimiques organiques synthétiques par l'industrie seront probablement très faibles puisqu'il s'agit de produits fabriqués, et non de déchets. D'ailleurs, à l'intérieur de l'usine, on peut éliminer tout déchet de produit chimique organique synthétique de la même façon que les gaz odorants, en envoyant dans la cheminée l'air qui les contient, soit à travers le foyer, soit en

l'introduisant en amont de l'échangeur de chaleur, ce qui entraîne la décomposition complète des molécules en cause. Les déchets de matières organiques, par exemple de plastiques, devraient toujours être détruits complètement et ne devraient jamais être brûlés à ciel ouvert.

Il y a de bonnes raisons de penser, d'après des enquêtes sur la pollution atmosphérique due aux gaz d'échappement des automobiles, que la matière organique, une fois dans l'air, finit par s'oxyder complètement. Il est indéniable que certains produits chimiques peuvent participer aux réactions qui forment de nouvelles substances irritantes intermédiaires dont l'existence est plus ou moins longue. On ne saurait guère attribuer ce type de pollution aux produits chimiques organiques synthétiques, mais c'est là un exemple de ce qui pourrait se passer si l'on rejetait dans l'air de véritables produits chimiques synthétiques.

Dangers à long terme de la pollution de l'air

Le tableau II donne la liste des polluants généraux de l'air ayant sur la santé des effets démontrés ou possibles. Les polluants atmosphériques d'origine locale (arsenic, béryllium, fluorure) y sont mentionnés, car des effets sérieux à long terme se sont manifestés chez les hommes et les animaux vivant à proximité des industries qui émettent ces substances.

Tableau II

Polluants de l'air produisant sur la santé des effets à long terme, reconnus ou potentiels, au degré de pollution généralement observé

Substances produisant des effets reconnus aigus ou chroniques	Substances considérées comme ayant en soi des effets à long terme (l'effet est indiqué entre parenthèses)	Effets potentiels à long terme des associations	Auteur
Amiante	Amiante (asbestose, mésothéliome)		
Anhydride sulfureux, anhydride sulfurique		SO ₂ , SO ₃ + poussières : aggrave les maladies du poumon	Amdur Lawther
Arsenic	Arsenic (dermatitis arsenicale)		
Béryllium	Béryllium (béryllose)	Be + F (les fluorures intensifient les modifications pulmonaires résultant de la béryllose)	Stokinger
Bioxyde d'azote	(Accélérateur modéré des tumeurs du poumon)	NO ₂ + micro-organismes (pneumonie) + HNO ₃ (bronchiolite fibreuse oblitérante) + goudrons (cancer du poumon des fumeurs)	Ehrlich et collab. Gray, Stokinger
Cancérogènes		Les cancérogènes produisent des tumeurs en présence d'agents favorisant leur action	
Carbures d'hydrogène		Carb. d'H + O ₃ favorise les tumeurs + influenza → cancer	Kotin
Fluorure		Fluorure (favorise ou accélère les maladies des poumons)	Stokinger
Hydrogène sulfuré (+ Mercaptans)		Rend les polluants plus agressifs (ne porte pas atteinte à la santé à strictement parler)	
Oxydants organiques (Peroxyacétylnitrates)			
Oxyde azotique		NO → NO ₂	
Oxyde de carbone		Effet de synergie dans l'appauvrissement en O ₂	Von Oettinger
Ozone	Ozone (altérations chroniques des poumons, vieillissement accéléré)	O ₃ accélérateur des tumeurs du poumon + micro-organismes	Stokinger Coffin
Plomb		Associé au plomb provenant d'autres sources	Kehoe
Poussières minérales	Poussières minérales (sclérose pulmonaire)		
Poussières organiques (agents de l'asthme)	Agents de l'asthme		Paulus

Parmi les seize polluants ou groupes de polluants atmosphériques mentionnés, on pense que sept ont des effets chroniques possibles (col. 2) aux niveaux réellement observés. Par contre (col. 3), la plupart des polluants de l'air généralement reconnus peuvent, dans certaines combinaisons et à certains niveaux, devenir une menace potentielle pour la santé.

Ces conclusions résultent d'études toxicologiques sur les animaux ou l'homme, d'expériences d'hygiène industrielle et d'études épidémiologiques.

Vu la morbidité respiratoire élevée et les taux de mortalité considérables des zones urbaines d'Europe et d'Amérique du Nord, on a pensé que l'aspiration d'air pollué provoquait, entre autres choses, des maladies respiratoires chroniques. Toutefois, l'incidence élevée que l'on cite pour la bronchite chronique dans les petites villes et les villages d'Italie et de Yougoslavie et la fréquence des affections cardio-pulmonaires dans certaines régions rurales de l'Inde donnent à penser que des facteurs autres que l'urbanisation et l'usage du tabac peuvent entrer en jeu.

D'autre part, étant donné la fréquence de l'irritation aiguë et subaiguë des voies respiratoires causée par la suie et le SO_2 en Europe, et les produits des réactions photochimiques à Los Angeles, on a supposé qu'il pouvait s'agir d'effets à long terme sur le système respiratoire. Peu d'études ont été effectuées sur les relations entre les effets aigus et les effets à long terme.

A la suite d'une enquête sur les conséquences à long terme d'une exposition aiguë à des polluants, laquelle avait provoqué immédiatement une augmentation de la mortalité à Donora, il a été constaté que chez les individus ayant subi des effets aigus en 1948, mais ne présentant antérieurement aucun symptôme d'affection respiratoire, la mortalité n'avait pas accusé d'accroissement dix ans après.

Le mécanisme de l'action des polluants et de leur absorption par les voies respiratoires; méthodes d'étude

On ne connaît guère le mécanisme des effets à long terme. En particulier, on manque de données sur les rapports entre les effets à long terme et les réactions des voies respiratoires à caractère aigu (rétrécissement du diamètre, sécrétion et toux). Il existe plusieurs systèmes de défense des voies respiratoires, dans lesquelles les éléments étrangers entrent en contact étroit avec le sang circulant dans le corps.

On trouve d'abord l'anatomie complexe de la cavité nasale et des voies respiratoires supérieures, qui arrêtent les poussières les plus grandes et les plus lourdes par impact et par dépôt. En général, les dimensions de ces particules sont proches de celles des poussières qui se déposent dans les bouches collecteurs servant à l'échantillonnage du milieu. Comme ces particules ne pénètrent pas dans les parties profondes du poumon, leurs conséquences, du point de vue de la santé, se manifestent surtout sous forme de réactions de la conjonctive contre les corps étrangers, et il est probable que les effets à long terme sont relativement peu importants.

Les particules plus petites (d'une dimension inférieure à 3 microns environ) traversent en général les voies respiratoires supérieures et atteignent les parties profondes du poumon. Elles peuvent s'y dissoudre, si elles sont solubles, ou être absorbées par les phagocytes si elles sont insolubles. Parfois, elles se déposent à la périphérie ou sont filtrées par les ganglions lymphatiques. S'il s'agit de poussières de quartz, d'autres minéraux, ou du béryllium, elles peuvent éventuellement entraîner la fibrose ou la granulomatose.

Ainsi, les dimensions des poussières, ou plus exactement leur vitesse de chute libre dans l'air, déterminent la région des voies respiratoires qui les reçoit ainsi que l'intensité et le type de la pollution.

Par contraste, c'est la solubilité des gaz qui détermine la région des voies respiratoires qui se trouve surtout attaquée par les polluants gazeux. A concentration élevée, la plus grande partie de l'anhydride sulfureux est absorbée par la muqueuse du nez et des voies respiratoires supérieures, mais à mesure que la concentration décroît, la proportion de la quantité absorbée par les voies respiratoires diminue.

Les polluants solides (même s'ils sont chimiquement inertes) et les gaz comme le SO_2 peuvent provoquer des modifications du diamètre des voies respiratoires, mesurables par leurs effets sur la résistance au passage de l'air. On a montré, au moyen d'expériences sur des animaux, que des particules inertes (NaCl), qui avaient peu d'effet en soi, pouvaient augmenter considérablement les effets de l'anhydride sulfureux sur la résistance des voies respiratoires. Ces expériences ont été suivies de nombreuses études sur les effets des combinaisons de poussières et de gaz. Il s'en dégage trois conclusions générales. Premièrement,

on pense que la surface de la particule est l'endroit où les molécules gazeuses peuvent réagir. On en trouve un exemple dans l'oxydation de SO_2 et de SO_3 , qui est facilitée par la réaction des gaz et des liquides à la surface de la particule. Ainsi, la concentration locale en molécules du polluant, à l'endroit où chaque particule frappe la surface d'une voie respiratoire ou d'une alvéole, peut être beaucoup plus élevée que la moyenne obtenue en supposant que les molécules du polluant sont réparties d'une façon uniforme dans l'air inspiré. Le troisième mécanisme résulte de l'aptitude des particules à transporter des molécules du polluant là où elles ne pourraient pas parvenir autrement. Par exemple, on a montré que de fines particules de suie s'associent si étroitement au benzo (a) pyrène que cette substance est entraînée profondément dans le poumon et s'y maintient pendant des jours, suffisamment longtemps, semble-t-il, pour provoquer le cancer squameux du poumon chez 70 p. 100 des animaux de laboratoire exposés.

Les réactions du poumon peuvent être diverses. On a déjà mentionné le rétrécissement des voies respiratoires et les réactions de fibrose et de granulomatose. Des modifications extrêmes du diamètre des passages respiratoires se produisent chez les asthmatiques. La sécrétion de mucus est l'un des mécanismes qui neutralisent et dissolvent les polluants gazeux et qui capturent les polluants solides. La bronchite chronique est une forme persistante et exagérée de ce mécanisme de défense. L'action exercée sur la membrane muqueuse peut entraîner l'épaississement de la couche de sécrétion ou une augmentation de l'épaisseur ou de la viscosité de la sécrétion elle-même. La vibration des cils peut se trouver influencée. On l'a démontré expérimentalement chez des animaux soumis à des concentrations élevées de certaines substances contenues dans l'air pollué. Si la couche de mucus est épaisse et si la vitesse de transport se ralentit, les bactéries et les autres substances aspirées peuvent rester dans les poumons après y avoir été déposées.

Il faudrait étudier la façon dont les divers polluants atmosphériques influencent l'efficacité de fonctionnement des poumons, ainsi que les effets de l'activité des cils vibratiles, et l'épaisseur et la viscosité du mucus. De même, il importe d'examiner plus en détail l'absorption de divers gaz par les voies respiratoires supérieures (SO_2 et ozone notamment).

/...

Parmi les substances mentionnées au tableau II, l'anhydride sulfureux, l'acide sulfurique, certains sulfates et le fluor sont avant tout des irritants aigus des voies respiratoires par action rapide. On pourrait leur ajouter d'autres polluants, comme le chlore, le formaldéhyde et l'acroléine, qui menacent surtout les membres de certaines professions.

Les réactions causées par l'ozone, le bioxyde d'azote et certains oxydes métalliques peuvent être aiguës et sérieuses, mais elles se manifestent souvent avec un retard de quelques heures.

On pense que les réactions dues au pollen, à la poussière de coton et de lin et à la pulpe de graines de ricin mettent en jeu un mécanisme immunologique où une autre réaction fonction du temps.

Le béryllium, l'amiante et le bioxyde d'azote ont des effets spécifiques à long terme qui, parfois, ne se manifestent complètement qu'au bout de plusieurs mois ou de plusieurs années.

Preuves des effets à long terme sur l'homme

On a souvent soupçonné qu'il existait un lien entre la pollution atmosphérique et les effets à long terme sur les voies respiratoires. Pour mieux connaître ces effets, il faudrait compléter l'étude épidémiologique des affections cardio-pulmonaires et de la fonction respiratoire par des expériences dirigées, faites sur l'homme ou en laboratoire, en choisissant avec réalisme les niveaux d'exposition et les combinaisons de polluants. Dans chaque cas, il conviendrait de prendre en considération l'influence de l'usage du tabac, des expositions résultant de la profession et d'autres variables, avant de pouvoir établir une relation de cause à effet entre la pollution atmosphérique et les affections respiratoires chroniques.

Maladies pulmonaires chroniques non spécifiques. Une série d'études exécutées avec soin a permis d'associer (partiellement) à la pollution atmosphérique la morbidité et la mortalité dues à la bronchite en Grande-Bretagne. Il en est question en détail dans le document sur la santé publique de l'OMS No 15 (Epidémiologie de la pollution atmosphérique), et l'on n'en parlera donc pas ici. Ces études analogues, effectuées dans d'autres pays, ont montré que la toux et les expectorations chroniques se manifestent également dans de nombreuses régions présentant des niveaux de pollution différents, et que

ces symptômes se produisent plus fréquemment chez les fumeurs de cigarettes que chez les non-fumeurs. Toutefois, la fréquence des essoufflements et des affections respiratoires prolongées a été plus grande à Londres que dans la campagne anglaise ou dans les villes des autres parties du monde. Les essais sur la fonction respiratoire donnent des résultats analogues. Au Japon, on a également montré que les affections respiratoires chroniques sont plus fréquentes dans les régions polluées.

Aux Etats-Unis, on signale que l'emphysème est une cause de décès plus fréquente dans les villes qu'à la campagne. Le lien entre l'emphysème et la pollution atmosphérique n'a pas encore été démontré aussi clairement que celui qui existe entre la bronchite chronique et la pollution mais cela peut être dû en partie à des différences dans le rassemblement des données sur ces deux maladies.

Effets de la pollution sur la santé des enfants. Des études faites sur des enfants et portant sur les fonctions alimentaire et respiratoire ont montré que la pollution atmosphérique était associée à l'anémie, à la morbidité, aux troubles de croissance et aux affections respiratoires.

Effets de la pollution, notamment sur le système respiratoire,
mis en évidence en laboratoire

Expositions combinées

Le tableau II montre clairement qu'aux niveaux ordinaires de pollution de l'air ou à ceux qui se rencontreront dans l'avenir prévisible, les risques à long terme résulteront sans doute non pas d'un seul polluant atmosphérique, mais bien d'une combinaison de polluants. Cette combinaison peut s'effectuer soit avec d'autres polluants de l'air, soit avec des micro-organismes infectieux.

Des études épidémiologiques et des études effectuées sur les animaux confirment l'effet multiplicateur des polluants atmosphériques. On a montré que le taux de mortalité de souris exposées une seule fois à des quantités infimes d'un irritant respiratoire, l'ozone, avait augmenté lorsqu'il y avait infection préalable ou subséquente par Klebsiella pneumoniae. Le bioxyde d'azote, à des concentrations aussi faibles que 0,5 partie par million, a de même agit en synergie avec ce micro-organisme, mais à la suite d'une exposition presque continue de plus de trois mois. On a provoqué chez des souris des cancers du poumon à

cellules squameuses vraies, analogues à ceux qui affectent l'homme, en les exposant à l'infection par le virus de l'influenza, puis à des doses importantes d'essence ozonisée. Les animaux exposés seulement à l'essence ozonisée n'ont subi aucun changement significatif; parmi ceux qui ont été soumis uniquement à l'infection, 8 p. 100 environ ont révélé des modifications squameuses des bronches, explicables par le processus de guérison après l'infection, avec seulement de rares altérations métaplasiques; toutefois, chez 30 p. 100 des animaux exposés aux irritants combinés, on a trouvé le carcinome squameux. Ainsi, la combinaison de l'infection avec la pollution atmosphérique peut faire apparaître les effets de cette dernière.

Etudes fonctionnelles

Grâce aux pléthysmographe global, on a recueilli nombre d'observations utiles concernant les effets, chez l'homme et l'animal, des irritants respiratoires sur l'écoulement gazeux, la pression intra-pleurale et la quantité d'air aspirée normalement. On a associé les changements de ces paramètres à des concentrations connues de SO_2 , SO_3 , O_3 , de vapeurs d'acide sulfurique, de gaz d'échappement des automobiles et d'autres substances, isolées ou combinées à des aérosols. De même, on peut utiliser le spiromètre pour mesurer les modifications, chez les animaux et chez l'homme, de la fonction respiratoire (consommation de O_2) après inspiration de polluants atmosphériques, et disposer ainsi d'un bon moyen de mesurer les altérations physiologiques des poumons. Le taux de diffusion de l'oxyde de carbone des alvéoles vers le sang (DL_{CO}) peut servir, chez l'homme, à mesurer les modifications des échanges gazeux de la respiration résultant d'une exposition aux polluants; si on l'associe à d'autres mesures, par exemple celles de la capacité vitale et du volume d'expiration forcée des poumons, on peut définir l'endroit sur lequel agit le polluant atmosphérique. D'après les effets sur le battement des cils vibratiles et sur les muqueuses des voies respiratoires supérieures, on peut évaluer les dommages que les polluants sont susceptibles de causer, qu'ils se présentent sous forme de poussières ou de gaz. De même, il est possible de mesurer les changements de l'épaisseur de la couche de sécrétion des muqueuses, ou ceux de la viscosité du mucus. D'autres méthodes servant à évaluer les effets des polluants atmosphériques sont fondées sur les variations du débit

sanguin que le poumon est capable de traiter et sur l'étude du taux d'absorption des gaz, des vapeurs et les poussières dans les voies respiratoires supérieures et inférieures.

Etudes biochimiques

Diverses mesures biochimiques fournissent des indices utiles sur les perturbations du fonctionnement normal des organismes. En général, elles ne sont pas spécifiques, mais elles constituent de bonnes sources d'information pour les études toxicologiques en laboratoire, et on pourrait les employer avec profit pour évaluer les effets des polluants sur les êtres humains. On ne connaît guère le rapport entre ces perturbations et les effets à long terme.

La mesure du taux de libération de ^{131}I par la thyroïde permet d'évaluer l'agression toxique contre le mécanisme homéostatique. Cette méthode a été utilisée pour mesurer les effets, sur les animaux, des polluants atmosphériques irritant les voies respiratoires. On peut l'employer pour mesurer d'autres réactions de la thyroïde à l'agression toxique, en particulier les états réfractaire et hyperactif. Comme elle permet des mesures très fines, il pourrait être utile de la comparer à la méthode fondée sur les réactions caractéristiques du comportement. De même, on peut mesurer des modifications de la fonction adrénales résultant de la pénétration de diverses substances dans les voies respiratoires en déterminant la concentration des corticoïdes urinaires.

La mesure quantitative des modifications de l'activité enzymatique, des produits de l'activité enzymatique (métabolites du corps) ou des cofacteurs enzymatiques constituent de bonnes méthodes biochimiques permettant de déceler rapidement les modifications du métabolisme provoquées par des expositions à long terme aux polluants atmosphériques. Les indicateurs biochimiques sont nombreux, et leur choix devrait se faire d'après les besoins toxicologiques.

L'indicateur biochimique qui offre probablement les possibilités d'application les plus étendues pour l'étude des altérations métaboliques chroniques chez les animaux est la glutathione pulmonaire (GSH). On a mesuré une diminution significative de la GSH des poumons chez les animaux à la suite d'une exposition aux polluants atmosphériques (huiles). Ces changements sont intervenus avant toute manifestation de modification histologique. La GSH est nécessaire pour l'intégrité des membranes cellulaires et pour l'activité de nombreux enzymes dont

le rôle est important. Ainsi, les enzymes dont l'activité dépend de l'existence de radicaux SH sont aussi de bons indicateurs des modifications biochimiques. Le changement de la proportion de protéines dans le sérum, en particulier du rapport albumine/globuline (A/G) déterminé par électrophorèse à travers le papier, est un bon indicateur général de perturbation métabolique. La spectroscopie d'absorption des ultra-violets offre un moyen rapide de déceler et de suivre les modifications du sang et des tissus. On peut utiliser les techniques immunologiques les plus sensibles pour détecter les anticorps circulants ou captifs dans le cas de certains polluants atmosphériques parmi les plus réactifs. Les modifications du mécanisme de défense du corps peuvent avoir des incidences importantes du point de vue de l'évaluation du degré de l'agression toxique, et aussi de la détermination du mécanisme de l'action du polluant. On a suggéré d'autres méthodes immunologiques : comptage des cellules du plasma, et détermination quantitative des modifications de l'aptitude du corps soumis aux agressions toxiques à fabriquer des anticorps après immunisation. Il faudrait continuer à étudier la question.

Effets sur la reproduction et génétique animale

Sans parler des méthodes utilisées depuis longtemps en toxicologie pour détecter les modifications chroniques, et consistant par exemple à mesurer le poids du corps, celui de la nourriture absorbée, les rapports des poids des organes à celui du corps, les modifications hématologiques et histologiques, on pourrait sans doute obtenir des données très utiles en étudiant les effets d'expositions de faible intensité sur la reproduction d'espèces animales de petite taille (souris ou rats) jusqu'à la génération F_2 .

Rétention du polluant

Les tendances de la rétention et de l'accumulation des polluants minéraux ou organiques et de leurs métabolites peuvent être déterminées par des méthodes spectrochimiques ou chimiques appliquées aux tissus et aux fluides du corps. On dispose déjà, pour certains pays, de données sur l'accumulation normale des métaux dans le corps humain, données qui peuvent servir de base à l'évaluation des modifications de la rétention et l'accumulation d'un polluant. L'analyse spectrochimique, ou mieux, l'analyse chimique du poumon et du foie ayant pour but de déceler les modifications dans les raies d'éléments-traces essentiels comme le

cuiivre, le molybdène et le zinc, révèlent chez les animaux des changements remarquables de la teneur des tissus à la suite d'une exposition à long terme aux polluants atmosphériques.

Production de tumeurs

Une méthode de haute sensibilité consiste à utiliser une souche de souris vulnérables aux tumeurs pulmonaires (par exemple CAF₁/Jax), chez lesquelles la fréquence des tumeurs est élevée et connue. En exposant aux polluants atmosphériques des souris de cette souche, ou d'une souche similaire, en examinant périodiquement leurs poumons pour déceler les tumeurs, et en les comparant avec des individus témoins, on peut mesurer l'effet d'accélération (ou de ralentissement) de la pollution atmosphérique sur les tumeurs du poumon.

Moyens de lutter contre la pollution atmosphérique et de la prévenir

La lutte contre la pollution atmosphérique se ramène en fin de compte à un problème technique. En principe, il devrait être possible de ramener la pollution atmosphérique du milieu à des niveaux inférieurs à ceux qui sont recommandés dans les directives sur la qualité de l'air, en appliquant une ou plusieurs des méthodes suivantes : a) "endiguer" les substances toxiques, c'est-à-dire éviter qu'elles s'échappent dans l'air ambiant; b) remplacer certains combustibles ou certains procédés techniques par des combustibles ou par des procédés nouveaux moins polluants; c) réduire la concentration des substances toxiques dans l'air en les diluant. On peut compléter ces trois méthodes en réduisant l'emploi de substances qui peuvent devenir des polluants atmosphériques, par exemple les pesticides.

Pour endiguer les substances toxiques, on peut employer diverses techniques (construction d'enceintes, ventilation et nettoyage de l'air) qui sont d'une grande efficacité, particulièrement dans le domaine sanitaire nucléaire. On doit toutefois signaler que l'amélioration de ces techniques entraîne une augmentation considérable des coûts de fonctionnement et que bien souvent le facteur économique gêne sérieusement leur application. Il faut aussi noter que ces techniques, bien qu'elles soient très efficaces, ne le sont jamais complètement.

Le remplacement des procédés polluant l'atmosphère par d'autres procédés qui n'entraînent pas l'émission de contaminants a obtenu en pratique un succès bien moindre. La raison en est évidente. Le nouveau procédé doit être équivalent



à l'ancien, au point de vue technique, sous tous les aspects essentiels, notamment en ce qui concerne la qualité du produit final, la disponibilité des matières premières, etc.; en outre, il ne doit pas être trop onéreux. Toutes ces conditions sont difficiles à remplir et demandent des recherches longues et coûteuses, tant sur le plan industriel que sur le plan toxicologique. Cependant, c'est parfois le seul moyen de lutter contre la pollution atmosphérique. Quant aux nouveaux produits chimiques synthétiques présentant des dangers, si l'on veut limiter leur emploi, il faudra disposer de substances ou de procédés de substitution acceptables.

La troisième méthode, celle de la dilution, ne devrait être utilisée que si les deux premières ne sont pas applicables ou ne sont pas satisfaisantes pour des raisons techniques ou économiques.

II. POLLUTION DES EAUX

Tendances actuelles et conséquences sanitaires de l'accroissement de la pollution

Dans l'ensemble du monde et dans chaque grande région, la totalité des ressources naturelles en eau douce est déterminée de façon relativement constante par les conditions hydrologiques. Toutefois, l'utilisation de ces ressources se développe rapidement par suite d'un accroissement continu de la population et de l'expansion industrielle. Le long de nombreux grands fleuves situés dans les pays hautement développés, on utilise l'eau douce plusieurs fois de suite, des sources à la mer. Chaque emploi modifie la qualité de l'eau, généralement aux dépens des utilisateurs ultérieurs et de la faune aquatique. Il existe une limite à la quantité de déchets qu'un cours d'eau ou un lac peuvent assimiler sans effets sérieux sur le bien-être physique, mental et social de l'homme. Dans de nombreux cas, cette limite a été atteinte ou dépassée.

Dans presque tous les pays développés, on s'inquiète de plus en plus de l'introduction dans l'eau de quantités toujours croissantes de produits chimiques et radioactifs qui ont sur l'homme des effets cancérogènes, toxiques et physiologiques.

En dépit de la complexité toujours plus grande de la pollution microchimique de l'eau, les considérations biologiques gardent leur importance. Les microbes de la fièvre typhoïde transportés par l'eau continuent à provoquer des épidémies lorsque des facteurs favorables coïncident avec une insuffisance du traitement des eaux. Une abondance d'éléments transporteurs et la forte résistance des entérovirus à la chloration constituent deux facteurs dominants dans la propagation des maladies virales, à un moment où les maladies entériques bactériennes sont en régression. Aux Etats-Unis, le nombre d'enfants âgés de moins de 15 ans qui sont des vecteurs d'entérovirus est en moyenne de 10 p. 100, et ce chiffre est probablement bien supérieur dans les pays moins développés. On ne dispose que de peu de données sur le nombre de vecteurs d'hépatite infectieuse, mais il peut être élevé là où les conditions sanitaires sont peu satisfaisantes. La fréquence relativement élevée de cette maladie, le nombre croissant de débuts d'épidémie par transmission hydrique et le déclenchement d'épidémies dues au ramassage de coquillages dans les eaux polluées confirment cette opinion.

/...

Les nématodes, les protozoaires et les rotifères vivant à l'état libre sont les groupes principaux de la phase zoologique du traitement aérobie des eaux d'égouts. Ils sont présents en nombre considérable dans les effluents. Quand ces derniers parviennent à un cours d'eau naturel, par exemple à un ruisseau, celui-ci reçoit les virus, les bactéries et les zoomicrobes qu'ils transportent. Dans la station d'épuration, les zoomicrobes s'alimentent surtout de bactéries qui se multiplient sur les particules de matière organique. On a constaté que les nématodes récupérés à partir d'effluents, de filtres d'égouttage et de bassins primaires de décantation contenaient dans leur intestin de petites quantités de E. coli et de streptocoques. Les éléments pathogènes peuvent survivre un ou deux jours à l'intérieur des nématodes. Pendant les grandes épidémies, de nombreuses personnes évacuent les éléments pathogènes dans les eaux d'égouts, et les nématodes peuvent alors servir de vecteurs.

D'autres zoomicrobes, particulièrement les ciliés nageurs, se nourrissent activement de bactéries en suspension, notamment de Salmonella et de Shigella, mais ils sont apparemment incapables d'absorber des virus qui sont trop petits pour que leurs cils puissent les entraîner. Les bactéries absorbées sont digérées si rapidement que le problème des vecteurs, s'il existe, ne se pose presque pas en ce qui concerne ces protozoaires.

La plupart des systèmes habituels d'épuration d'eau sont capables d'éliminer efficacement la majorité des polluants biologiques, mais dans de nombreux pays en voie de développement, l'eau mise à la disposition des habitants n'est pas nécessairement potable. D'après des statistiques rassemblées par l'OMS, 20 p. 100 seulement de la population mondiale a accès à l'eau courante amenée par des conduites et, si l'on exclut les pays hautement développés, 5 p. 100 seulement de la population restante bénéficie de ce service.

En dehors de la dégradation des eaux de surface et des eaux souterraines due aux agents chimiques et biologiques, il faut aussi examiner sérieusement l'action des polluants physiques, parmi lesquels la chaleur et la radioactivité sont les plus importants.

Lorsque la température des eaux de surface est élevée, il y a perte des gaz dissous, donc diminution de la teneur en oxygène dissous, ce qui se répercute sur la faune et la flore aquatiques. Non seulement la quantité d'oxygène disponible

diminue, mais son taux d'assimilation par les processus métaboliques augmente; ainsi, la chaleur contribue à désoxygéner les eaux de surface de deux façons différentes. De plus, la pollution thermique est grave parce qu'elle gêne l'emploi ultérieur de l'eau par les entreprises industrielles et les municipalités.

La pollution de l'eau douce n'est pas la seule à prendre en considération. Par exemple, des poissons migrateurs comme le saumon passent de la mer aux estuaires puis aux cours d'eau douce. Dans de nombreux pays industriels, il existe de grandes villes et des usines sur les rives des estuaires qui, souvent, sont ainsi bien plus pollués que les cours d'eau qui s'y terminent. Tel est certainement le cas du Royaume-Uni où des pêcheries importantes de saumons ont été détruites lorsque le passage des estuaires est devenu impossible aux saumons adultes et aux jeunes, bien que la pollution des rivières se jetant dans ces estuaires soit restée relativement minime.

Contamination chimique de l'eau

Origine des polluants

Les contaminants chimiques qui pénètrent dans les eaux de surface et les eaux souterraines y parviennent par l'intermédiaire de trois vecteurs principaux :

- 1) les déchets et les effluents de collectivités munies ou non d'égouts;
- 2) les déchets et les effluents d'industries non reliées au système public d'égouts;
- 3) les eaux de ruissellement et d'infiltration provenant des eaux de pluie collectées par les systèmes de drainage des régions urbaines et rurales.

Dans les collectivités munies d'égouts, les ménages et les institutions sont les sources principales de détergents synthétiques usés, l'apport des entreprises industrielles étant moindre. Les industries, au contraire, fournissent les quantités les plus importantes d'autres substances organiques synthétiques, qu'il s'agisse des déchets de leur production ou de liquides rejetés après avoir servi au processus de fabrication. Les effluents évacués dans l'eau varient en nature et en concentration selon le type d'industrie et les conditions de fabrication. Normalement, la concentration (et, dans le cas de substances non persistantes, la nature et la concentration des produits de décomposition intermédiaires et définitifs) est modifiée par le traitement des eaux d'égouts avant que les effluents ne parviennent aux cours d'eau. La nature et l'intensité des opérations d'épuration présentent donc de l'importance dans le traitement chimique de l'eau.

Dans les collectivités démunies d'égouts qui évacuent leurs déchets dans le sol ou les accumulent sur terre, d'où ils peuvent parvenir aux cours d'eau, la contamination peut aussi s'étendre aux eaux souterraines et aux réserves de surface. Lorsqu'on tire l'eau du sol et qu'on y renvoie les eaux usées par l'intermédiaire de dispositifs de filtrage se trouvant à proximité, les éléments chimiques utilisés peuvent conserver en grande partie leur nature et leur concentration.

Les entreprises qui ont besoin de grandes quantités d'eau pour le refroidissement ou pour la fabrication s'installent souvent au bord de cours d'eau importants. Comme il existe une communication directe entre l'entrée et la sortie par l'intermédiaire de l'usine, la possibilité de décharge intentionnelle ou accidentelle de déchets chimiques non modifiés se trouve augmentée.

Les eaux de ruissellement et d'infiltration résultant des pluies en zone urbaine semblent surtout présenter une importance, dans les villes modernes, lorsque les précipitations, du fait de leur intensité et de leur durée, font déborder des quantités appréciables d'eaux d'égouts et de déchets provenant de systèmes d'égouts existants vers des eaux qui normalement, par temps sec ou lors de chutes de pluie modérées, sont bien protégées contre la pollution. De fortes concentrations de produits chimiques peuvent alors parvenir aux eaux d'écoulement et descendre le courant comme un "piston" ou se déplacer en masses à l'intérieur de lacs, d'étangs et de réservoirs, avant de se diluer par diffusion.

On connaît mal la pollution chimique des eaux de ruissellement et de l'infiltration "naturelles", mais il y a lieu de supposer que ces écoulements intermittents contiennent des substances lessivées ou en suspension qui proviennent des terres cultivées, des champs et des forêts.

Nature et concentration des polluants

Comme le transport intentionnel ou accidentel de déchets par l'eau fait partie de la civilisation actuelle, fortement axée sur l'hydrologie et l'hydraulique, il est concevable que les eaux qui doivent servir à étancher la soif de l'homme et de l'animal contiennent à un moment ou à un autre, à un endroit ou à un autre, tous les produits chimiques que l'homme retire de la nature ou synthétise pour ses besoins. Ainsi, l'intensité de la pollution par les produits chimiques et l'importance numérique de la population menacée déterminent l'importance du danger qui se crée. La composition de la population, ainsi que la facilité avec laquelle les

polluants chimiques peuvent être enlevés, modifiés ou détruits par les processus d'épuration habituels ou spécialisés, sont des facteurs significatifs mais moins importants.

Détergents synthétiques. Le fait que des produits chimiques organiques synthétiques aboutissent dans les eaux de surface et dans les eaux souterraines, parfois en concentrations notables, est amplement démontré par l'écume d'aspect disgracieux qui recouvre les cours d'eau, les étangs et les lacs et surgit des sources et des puits. Comme les détergents persistants anioniques, qui sont presque les seuls responsables des signes visibles de la pollution de l'eau, ne sont pratiquement pas toxiques (bien que les données sur les effets de leur absorption prolongée par l'homme ne soient pas encore complètes), toute action administrative en interdisant l'emploi doit être surtout fondée sur des considérations esthétiques. Toutefois, lorsqu'il s'agit d'approvisionnement en eau, le goût et l'aspect ne sauraient être négligés, bien qu'ils cèdent le pas à la toxicité. D'autre part, il est intéressant de noter que l'on inclut dans les détergents des "adjuvants", qui contiennent entre autres choses des polyphosphates jouant le rôle d'agents complexants. Ces corps ne sont pas non plus toxiques, mais ce sont eux qui contribuent le plus à faire passer les lacs et autres étendues d'eau profonde au state eutrophe. En fournissant des éléments nutritifs essentiels aux algues, aux diatomées et aux autres organismes planctoniques, les phosphates augmentent le nombre et l'intensité des floraisons (multiplications soudaines) de ces organismes. Il se forme des écumes d'aspect et d'odeur déplaisants qui gâchent le plaisir de la baignade. En outre à cause de ces écumes, il est difficile d'obtenir en quantité suffisante de l'eau potable et de bon goût.

Identification des produits chimiques organiques synthétiques dans l'eau. A quelques exceptions près, on ne connaît pas avec certitude les dangers que présente la toxicité des produits chimiques synthétiques modernes que l'on retrouve dans l'eau potable; on ne peut pas non plus s'attendre à acquérir les connaissances voulues avant de pouvoir identifier la nature et la concentration des polluants en cause.

Grâce à la méthode d'extraction au carbone et au chloroforme (on fait passer près de 20 000 litres d'eau de rivière à travers un filtre de carbone, après quoi on extrait, par le chloroforme, les éléments adsorbés), on a pu classer les /...

cours d'eau des Etats-Unis, depuis les eaux relativement propres jusqu'aux eaux sérieusement polluées par les déchets industriels. La Columbia, au niveau du barrage de Bonneville dans l'Oregon, offre un exemple de pollution peu prononcée par les déchets domestiques; on y trouve 24 parts d'extrait carbone-chloroforme (ECC) par 1 000 millions; la Kanawha, à Winfield (Virginie occidentale) fournit un exemple de pollution industrielle intense, avec 457 parts d'ECC par 1 000 millions. En outre, on a pu identifier dans l'ECC la présence de DDT, d'aldrine, d'orthochloronitrobenzène, de tétraline, de naphthalène, de chlorure d'éthyle, d'éther, d'acétophénone, d'éther diphényle, de pyridine et d'autres bases azotées; de phénols de diverses espèces, de nitriles, de dérivés acides; d'hydrocarbures divers (notamment de composés de substitution du benzène), de kérosène, de détergents synthétiques, d'aldéhydes, de cétones et d'alcools. On sait que certaines de ces substances sont toxiques. De nombreux autres composés n'ont pas été identifiés, bien que leur présence ne laisse aucun doute. L'application des méthodes de chromatographie et de spectrophotométrie a facilité cette analyse. On a pu identifier dans l'eau de rivière des insecticides chlorés typiques à des concentrations inférieures à 10 parts par 1 000 millions, au moyen d'échantillonnages au filtre de carbone, de la chromatographie par adsorption et de la spectrophotométrie infrarouge.

Accumulation des contaminants. Fait significatif, de nombreux produits chimiques dissous ne sont pas modifiés par les méthodes actuelles de traitement des eaux usées. Il en résulte que la concentration en contaminants augmente après réutilisation de l'eau. Les agglomérations se trouvant en aval sont donc soumises à des concentrations croissantes d'une variété de polluants chimiques. Si l'on prend à titre de comparaison les chiffres cités pour la Columbia et la Kanawha, par exemple, les eaux très polluées de la rivière de Detroit près de Wyandotte (Michigan), et le Merrimack à Lawrence (Massachusetts) ont donné respectivement 465 et 743 parts d'ECC par 1 000 millions. A Chanute (Kansas), les eaux souillées recyclées à travers un réservoir de la Kaw River, essentiellement à sec, titraient 992 parts d'ECC par 1 000 millions.

Pesticides présents dans l'eau. On a trouvé du DDT dans plusieurs grands fleuves des Etats-Unis, à des concentrations allant de 1 à 20 parts par 1 000 millions. Les pesticides que l'on répand sur la végétation ou le sol pour lutter contre les espèces nuisibles à l'agriculture sont absorbés en partie par les

plantes ou s'y déposent sous forme de résidus, s'évaporent en partie ou se fixent dans le sol, se dégradent en partie ou restent inchangés, et se trouvent enfin lessivés en partie par les eaux de pluie ou d'irrigation pour réparaître après ruissellement ou infiltration.

Le transport et la dégradation varient selon la nature du produit chimique et les corps avec lesquels il entre en contact. On a fait beaucoup pour déterminer ce que devient le pesticide afin de satisfaire l'utilisateur du produit, mais non pour assurer la bonne qualité de l'eau. L'importance de la menace que les pesticides chimiques représentent pour l'approvisionnement en eau potable reste à démontrer, et à cet effet, il faudra poursuivre les recherches. Cependant, il est certain que l'emploi généralisé des pesticides chimiques a créé un nouveau problème de pollution de l'eau qui ne peut être résolu comme on l'a fait dans le passé lorsqu'il s'est agi d'évacuer les eaux d'égout ou les déchets industriels. L'utilité économique des insecticides est tellement grande que l'on peut s'attendre à ce que des quantités croissantes de ces produits chimiques synthétiques atteignent les réserves d'eau. Il faut donc être prêt à les éliminer lorsqu'ils se manifesteront en concentrations importantes. Toutefois, la tendance actuelle consiste à éviter les difficultés en mettant au point des pesticides moins stables pour l'agriculture.

Substances cancérigènes. Les produits pétroliers et les déchets de raffinerie sont en général mentionnés parmi les substances susceptibles de provoquer des mutations ou des cancers. On a déjà émis l'idée qu'il existe des eaux superficielles dans lesquelles les installations industrielles évacuent des déchets contenant des substances de cette nature. On a signalé avoir récupéré divers carbures d'hydrogène à chaînes multiples dans des boues d'égouts; on pense en particulier que l'effluent bien connu des routes en macadam ainsi que la suie atmosphérique y sont entraînés par la pluie. Les composés cancérigènes aromatiques aminés, comme la bétanaphthylamine et la benzidine, proviennent des usines de matières colorantes et de caoutchouc et peuvent être évacués dans les égouts des collectivités avec les produits nitrés analogues utilisés dans la production des composés aminés, notamment des teintures amincazoïques, des aminostilbènes, et des teintures à base de triphénylméthane et de diphénylméthane. Les usines de produits pharmaceutiques, de teinture des textiles, de produits plastiques, etc., sont également des sources de substances organiques de ce genre. Certains produits intermédiaires, comme

L'orthochloronitrobenzène, ont été retrouvés dans le Mississippi en quantités notables. Ils sont peut-être très stables. Par exemple, le chloronitrobenzène évacué dans le Mississippi à Saint-Louis (Missouri) pouvait se retrouver dans de l'eau prélevée à la Nouvelle-Orléans (Louisiane) à des centaines de kilomètres de distance et après des jours de voyage.

Il y a donc lieu de penser que des composés peut-être dangereux se trouvent dans les eaux polluées, et que si l'on consomme, pendant une vie entière ou pendant longtemps, une eau provenant de sources polluées, l'absorption normale de substances cancérigènes en provenance de toutes les sources s'en trouvera augmentée. En l'absence de méthodes sûres permettant d'analyser les produits dangereux, il faut faire appel aux études épidémiologiques à long terme des populations exposées pour obtenir les preuves nécessaires, lesquelles, en l'occurrence, risquent malheureusement de n'être que des présomptions. Les décisions finales quant aux conditions et au degré d'exposition des populations doivent se fonder sur des renseignements résultant de l'étude minutieuse de l'évolution des polluants chimiques en cause.

Normes toxicologiques

En ce qui concerne les nouveaux produits chimiques organiques synthétiques, il est urgent d'étudier attentivement les conséquences qu'a pour la population l'ingestion prolongée de quantités relativement faibles de substances susceptibles d'être dangereuses. Les données des analyses biologiques effectuées au moyen de divers organismes aquatiques, telles qu'on les exécute actuellement, ne sont pas directement applicables à l'homme. Par exemple, les poissons sont capables d'absorber et de libérer des produits toxiques, sans que ceux-ci entrent nécessairement dans le métabolisme. Les accidents, qui sont si utiles pour identifier des niveaux de toxicité intenses dans l'industrie, n'apporteraient peut-être que peu de renseignements sur les empoisonnements chroniques. Les recherches qu'on fait actuellement sur la toxicité chronique en se servant d'animaux de laboratoire s'appliquent normalement à des groupes d'animaux qui sont relativement peu nombreux, si on les compare à l'importance des populations humaines pouvant être exposées. Ainsi, les effets produisant une morbidité réduite ne seraient pas remarqués. En outre, on ne s'attend pas à ce que les effets des substances toxiques soient exactement identiques chez les animaux et chez l'homme. Il se peut que les

/...

substances toxiques aient des effets cumulatifs et qu'il existe des phénomènes de synergie, et c'est là un point à étudier.

Dans ces conditions, il est peut-être possible de tirer des renseignements de l'expérience acquise en hygiène industrielle, particulièrement lorsque les données toxicologiques sur lesquelles se fondent les normes industrielles comprennent des expériences sur l'alimentation des animaux ainsi que des observations sur les réactions de groupes appréciables de populations exposées.

Actuellement, de nombreux services de santé publique estiment qu'il ne faut encore fixer aucun chiffre quant à la concentration tolérable des substances cancérogènes connues entrant dans la composition des nouveaux produits chimiques.

Les aliments tirés du milieu aquatique

Les poissons et les coquillages constituent presque la seule nourriture humaine qui proviennent des eaux naturelles. Les vertébrés sont sensibles à une grande variété de produits chimiques organiques. Par conséquent, on fait des analyses biologiques sur des espèces choisies, afin de détecter la pollution chimique. Comme l'effet le plus probable de la pollution chimique de l'eau est la mort des poissons servant à l'essai, on reconnaît facilement le danger. Toutefois, il est possible que les poissons et d'autres êtres aquatiques consommés par l'homme ne soient pas sensibles à des substances qui sont très toxiques pour l'homme. Par exemple, une affection neurologique à caractère "épidémique" a été attribuée à la consommation de poissons qui avaient absorbé des composés alkyles du mercure provenant d'effluents évacués par une usine et parvenant à des zones de pêche maritimes. Ce danger potentiel fait ressortir combien il importe de maintenir les effluents dangereux des usines à l'écart des sources de nourriture humaine.

Problèmes actuels

Les détergents synthétiques et leurs résidus

L'histoire de la pollution par les détergents illustre les conséquences de l'introduction d'un nouveau type de contaminant microchimique dans le milieu aquatique, et les mesures qui ont été prises pour atténuer les dommages qui en ont résulté. Les mélanges détersifs ménagers dont la vente s'est généralisée il y a une quinzaine d'années se composaient essentiellement d'alkylbenzène sulfonate

/...

(molécule formée d'un noyau benzénique auquel se rattachent un groupe de sulfonate de sodium et une chaîne alkyle contenant en général 8 atomes de carbone ou plus). Au début de l'emploi de ces produits, la chaîne alkyle était ramifiée, et l'on a découvert plus tard que ce fait est important, bien qu'on ne s'en soit pas rendu compte lorsque ces produits sont apparus sur le marché.

On a rapidement constaté que ce type de surfactif était particulièrement résistant à la décomposition par l'action bactérienne. En cela, il était très différent des savons qu'il a remplacés, puisque ces derniers sont rapidement décomposés et ne créent aucune difficulté spéciale dans les eaux où ils sont finalement évacués.

Par suite de sa résistance à l'action bactérienne, l'alkylbenzène sulfonate, sous sa forme initiale, n'était que partiellement décomposé pendant le traitement des eaux d'égout, et la moitié environ de la quantité présente à l'origine était ultérieurement évacuée dans l'effluent. Une propriété caractéristique de cette substance est qu'elle réduit le rythme auquel l'oxygène passe de la phase gazeuse à l'état de solution dans un liquide. Comme l'épuration des eaux d'égout par action bactérienne est essentiellement un processus aérobie, il est très important d'obtenir une bonne dissolution de l'oxygène, et des méthodes coûteuses d'aération deviennent nécessaires pour l'obtenir au degré souhaité. Ainsi, la présence de résidus détersifs, en s'opposant à ce processus, a entraîné un accroissement considérable du coût du traitement des eaux usées. Si l'on n'ajoutait pas une installation d'aération, on constatait une détérioration sérieuse de la qualité des eaux traitées.

Par ailleurs, les résidus évacués dans les eaux de surface provoquaient aussi une détérioration considérable de leur qualité. On connaît bien les mousses d'aspect rebutant qui sont apparues dans de nombreux cours d'eau, particulièrement en aval des zones de turbulence. Les résidus avaient un autre effet moins évident, mais tout aussi important : ils ralentissaient le rythme de mise en solution de l'oxygène de l'air dans les eaux de surface, et donc le processus d'auto-épuration en aval des points d'évacuation des effluents. En outre, certains experts ont estimé que les résidus détersifs avaient un effet néfaste sur les plantes et les animaux aquatiques. Il est possible que ce diagnostic ne s'applique que là où les résidus sont présents en concentrations exceptionnellement élevées.

Après de longues discussions techniques sur les moyens de surmonter ces difficultés, on est en général arrivé à la conclusion que la solution la plus pratique (sinon la seule) était de mettre au point de nouveaux surfactifs qui soient plus vulnérables à l'attaque bactérienne. Les fabricants intéressés ont alors entrepris des recherches intensives à cette fin. Des centaines de produits expérimentaux ont été essayés et l'on peut maintenant affirmer que l'objectif - produire des substances susceptibles de se dégrader en totalité ou en grande partie - se trouve maintenant en vue*. On a découvert que si le côté alkyle de la chaîne d'atomes de carbone était droit au lieu d'être ramifié, la résistance à la décomposition bactérienne s'en trouvait très diminuée, et c'est cette observation qui a orienté les travaux. Ce bref historique est présenté à titre d'introduction au problème plus récent que pose l'augmentation de l'emploi d'autres substances organiques synthétiques, notamment des pesticides.

Autres substances organiques synthétiques

La présence de substances organiques synthétiques persistantes dans les eaux usées ne saurait présenter une menace pour la santé que lorsque les effluents atteignent les eaux servant aux besoins des ménages et des collectivités. On suppose naturellement que l'eau provenant de ces sources polluées sera convenablement traitée et désinfectée avant d'être distribuée. Là où c'est le cas, il semble que l'eau traitée n'a pas d'effet néfaste sur la santé humaine. Par exemple, au Royaume-Uni, où l'approvisionnement en eau de la ville de Londres provient d'une part de cours d'eau contenant des eaux usées, et de l'autre de puits profonds, les statistiques sanitaires établies par les autorités centrales n'ont jusqu'ici révélé aucune différence importante entre les indices sanitaires des groupes desservis par ces deux sources. On suppose que la concentration en substances organiques résistant à l'action biologique n'augmentera, dans les eaux servant à l'approvisionnement du public, que dans la mesure où la proportion des effluents s'accroîtra elle-même dans ces eaux.

* Les détergents synthétiques employés en 1966 sont en grande partie susceptibles de dégradation. On ne sait pas encore s'ils sont plus ou moins toxiques que les anciens détergents synthétiques. D'après une étude, il semblerait que ces substances (ou les produits de leur dégradation) soient plus toxiques pour le poisson que les détergents du type ancien. /...

Toutefois, on a constaté un accroissement plus rapide (du moins dans les pays industrialisés) des quantités de matières organiques persistantes déversées dans les réseaux d'évacuation d'eau du fait de l'emploi de divers procédés industriels; il s'agit par exemple des matières provenant des entreprises pétrolières ou chimiques. On a identifié certaines de ces substances en utilisant des techniques modernes perfectionnées. Il ne fait pas de doute que la présence de certains de ces contaminants au moins soit indésirable dans l'eau destinée aux besoins domestiques. Toutefois, dans de nombreux cas, une solution technique est possible; c'est ainsi qu'on peut appliquer les méthodes de traitement existantes, ou mettre au point des méthodes nouvelles permettant d'éliminer ces composés des effluents industriels avant leur évacuation.

Pour ce qui est des pesticides organiques synthétiques, les recherches relatives à leurs effets secondaires sur le milieu ont surtout été entreprises aux Etats-Unis. Ailleurs, au Royaume-Uni par exemple, l'utilisation des pesticides est bien moins généralisée, et la mortalité qui en résulte dans la faune sauvage n'atteint pas le même niveau, tant s'en faut. Néanmoins, on a constaté récemment des pertes considérables d'oiseaux au Royaume-Uni. Une portion considérable des pertes en animaux sauvages dues aux pesticides ne concerne naturellement pas l'habitat aquatique. Toutefois, dans le cas de ce dernier, les données recueillies aux Etats-Unis indiquent que divers organismes ont subi des dommages considérables. C'est surtout sur ces indications qu'il convient de se fonder actuellement pour prédire ce qui risque de se passer dans d'autres pays, où l'emploi de pesticides organiques synthétiques va en croissant.

Tout d'abord, on a trouvé des résidus de pesticides dans les principaux systèmes fluviaux des Etats-Unis, à des concentrations variant entre 0,1 et 5 parts par 1 000 millions. De telles concentrations sont faibles, mais leurs effets sont pernicieux. Ainsi, l'influence directe de la toxicité de certains pesticides sur les poissons est extrêmement prononcée, comme le montre le fait que dans l'espace de quatre jours, la moitié d'un groupe témoin de truites est mort après avoir été exposé à une concentration d'endrine qui n'était que de 0,5 part par 1 000 millions.

/...

Deuxièmement, il est certain que la concentration des pesticides présents dans l'eau en faible quantité peut être multipliée par l'action des organismes aquatiques, notamment des algues, et que cette concentration peut ainsi augmenter de maillon en maillon dans la chaîne alimentaire. Ainsi, il se peut que les poissons eux-mêmes ne soient pas tués par les faibles concentrations de cette pollution microchimique, mais leur corps peut contenir des résidus de pesticides en quantité suffisante pour rendre malades ou tuer les oiseaux qui s'en nourrissent. Sous ce rapport, il faut noter qu'au Royaume-Uni (où, en dépit d'observations et d'enquêtes périodiques, on n'a attribué aux pesticides aucune mort de poissons dans les eaux de surface, sauf dans quelques cas exceptionnels résultant de causes anormales, par exemple d'évacuations accidentelles), un premier indice - la découverte de concentrations élevées de résidus dans les oiseaux qui se repaissent de poissons - donne à penser que la situation pourrait devenir grave.

Aux Etats-Unis, de nombreuses observations semblent montrer que dans certaines régions les poissons se trouvent sérieusement menacés par les pesticides. Par exemple, on sait que dans l'Etat de New York, la reproduction des truites a été très compromise à une époque où le vitellus (dans lequel du DDT s'était accumulé) était absorbé par les alevins. Dans d'autres régions, on a constaté que des poissons étaient morts en masse après pulvérisation de pesticides répandus par des avions. Ces pertes se produisent parfois après la première pluie qui suit la pulvérisation, et des expériences effectuées en Georgie ont démontré que les eaux d'écoulement d'une zone soumise à la pulvérisation étaient toxiques pour le poisson. Une étude prolongée des résultats de l'épandage d'insecticides par avion sur des forêts (l'objectif étant de lutter contre un parasite du sapin dans les bassins d'écoulement de nombreuses rivières à saumon du New Brunswick, au Canada), a fourni nombre de renseignements précis au sujet des répercussions des pesticides sur les organismes aquatiques. Pendant la plupart des opérations de traitement, entre 1954 et 1960, du DDT a été dispersé à raison de 550 grammes à l'hectare. Après ces opérations, la faune des insectes aquatiques a diminué brusquement de manière significative, leur réapparition demandant jusqu'à six semaines. On a constaté que les espèces du fond, qui sont les plus grandes et sont la nourriture

préférée des tacons^{1/}, avaient besoin de longues périodes pour se rétablir; selon l'espèce, il fallait au moins deux ans aux perles, trois ans aux éphémères, quatre ans aux phryganes. Ce n'est qu'après quatre à cinq ans, pendant lesquels on s'est abstenu de tout traitement, que la composition des espèces des insectes aquatiques est revenue à la normale. Pour ce qui est des dommages directs causés aux poissons, les effectifs des groupes de jeunes saumons de toutes tailles ont été considérablement réduits après l'épandage, le nombre des saumons de moins d'un an n'atteignant plus que 2 à 10 p. 100 du nombre enregistré avant le traitement. La proportion des petits tacons était de 30 p. 100 et celle des grands tacons de 50 p. 100; par rapport aux zones non traitées, en outre, les taux de croissance des survivants ont été ralentis à cause des perturbations causées aux sources de nourriture, dont il a été question ci-dessus. Depuis 1960, on utilise beaucoup de DDT à la dose de 275 grammes à l'hectare. Des applications uniques à cette dose ont entraîné des mortalités de poissons bien moindres, et des essais récents portant sur un insecticide organique, le Phosphamidon, dosé à 550 grammes à l'hectare, ont montré qu'il constituait un produit de remplacement prometteur, ne causant que des dommages insignifiants aux populations de poissons et n'ayant aucun effet manifeste sur les insectes aquatiques pendant les trois semaines qui suivent l'épandage.

De même, grâce à l'emploi de méthodes extrêmement sensibles d'analyse chimique pour étudier les pertes massives de poissons récemment constatées dans le Mississipi inférieur, on a montré que la concentration d'endrine dans le sang de ces poissons était suffisamment élevée pour avoir causé leur mort. Chose plus surprenante encore, on trouverait maintenant, paraît-il, des concentrations mesurables de résidus de pesticides dans les poissons marins (même ceux des eaux relativement ouvertes). En fait, certaines preuves frappantes de l'accumulation de résidus de pesticides proviennent de l'examen des poissons de mer et des poissons d'estuaire ainsi que des oiseaux de mer qui s'en nourrissent. Le Clear Lake, en Californie,

^{1/} La majorité des jeunes saumons du New-Brunswick passent trois ans dans les cours d'eau pendant leur migration vers la mer; ils peuvent être classés d'après leur taille, en trois groupes correspondant approximativement à leur âge : alevins de moins d'un an, petits tacons et grands tacons.

aux Etats-Unis, offre un exemple depuis longtemps connu de l'importance de l'accumulation de ces résidus dans les oiseaux qui se repaissent de poissons. En 1954, puis en 1957, on a traité ce lac au DDT à une concentration de 2 parties par 10^{-8} pour lutter contre un moucheron non piquant, Chaoborus astictopus; après la deuxième application, les produits de décomposition de cette substance ont été retrouvés à une concentration de 1,6 partie par 10^{-3} dans les tissus adipeux des grèbes qu'on y a trouvé morts. On a obtenu très récemment des chiffres sur les concentrations de DDE et de dieldrine dans les oeufs d'oiseaux mangeurs de poissons des Iles britanniques, qui se nourrissaient dans des eaux où l'on n'avait jamais utilisé directement de composés organiques synthétiques pour se débarrasser des animaux nuisibles. A titre d'exemple des concentrations enregistrées, on a découvert 8 à 28 parties par 10^{-6} de DDE et de dieldrine associés dans les oeufs de hérons (Ardea Cinerea) et 1,6 à 3,2 parties dans ceux des hirondelles de mer (espèce Sterna).

Les dangers à long terme de la pollution des eaux

L'établissement de normes pour l'eau potable diffère notablement de celui des normes concernant l'air respiré dans l'exercice de telle ou telle profession; le nombre de substances contenues dans l'eau dont la teneur fait l'objet de règlements est réduit à un minimum, car promulguer une norme équivaut à exiger des analyses périodiques permettant de s'assurer que ladite norme est bien respectée, ce qui est matériellement impossible lorsqu'on a affaire à des centaines de substances. Toutefois, pour ce qui est de la pollution des eaux, on a recours à deux méthodes qui dispensent d'effectuer séparément des essais sur un grand nombre de substances :

1. Emploi de concentrations limites d'indicateurs; par exemple, l'alkylbenzène sulfonate sert d'indicateur des polluants détersifs synthétiques, de la réutilisation de l'eau et du degré général de contamination.
2. Emploi de l'analyse groupée; par exemple, le poids total des solides dissous (TSD) et celui des substances qui peuvent être extraites par le chloroforme à partir de filtres au carbone (ECC) servent respectivement d'indicateurs de la pollution chimique minérale et organique. Une analyse unique peut fournir ainsi un index applicable soit à l'ensemble des matières minérales dissoutes, soit à l'ensemble de la pollution organique. /...

Sous les climats chauds, on peut s'attendre à une consommation journalière d'eau de boisson bien supérieure à celle des pays tempérés, et la quantité de polluants absorbée peut être jusqu'à cinq fois plus grande. Ainsi, les populations des pays tropicaux risquent d'absorber jusqu'à cinq fois plus de polluants transportés par l'eau que les habitants des pays tempérés, en supposant que les concentrations d'un contaminant donné dans l'eau de boisson soient égales. Une bonne partie du travail portant sur les normes existantes se fonde sur la consommation observée dans les climats tempérés et il paraît indiqué de mettre au point et d'appliquer des critères convenant aux régions plus chaudes. Des mécanismes importants, générateurs d'effets synergiques dans les voies respiratoires, ne fonctionnent pas dans les voies digestives; on en trouve un exemple dans l'adsorption des gaz et des vapeurs par des matières solides finement divisées. L'intensification apparente des effets des actions combinées des micro-organismes et des contaminants dans les poumons ne paraît avoir aucune importance dans les voies digestives. Toutefois, comme dans les poumons, on constate un effet de potentialisation des substances cancérigènes, dû à des agents qui favorisent et accélèrent leur action.

Sans aucun doute, le profane comme le savant s'inquiètent de savoir que l'être humain absorbe dans sa nourriture et dans l'eau des polluants qui peuvent avoir sur sa santé des effets néfastes immédiats ou à long terme. Il faut remarquer que l'industrie produit de nombreuses substances nouvelles qu'on fait passer dans la nourriture et dans l'eau ou qui finissent par y arriver. On craint que ces substances n'aient pas fait l'objet d'une évaluation suffisante quant aux dangers qu'elles peuvent présenter pour la santé.

Quantitativement, la nourriture peut être une source de polluants plus importante que l'eau. L'analyse suivante porte sur les polluants de l'eau, mais on ne saurait négliger le rôle des aliments lorsqu'on examine les effets sur la santé des polluants absorbés.

L'eau, dans son état naturel, est toujours une solution aqueuse diluée de substances organiques et minérales. On considère en général qu'une eau potable est une solution limpide, sans couleur, sans odeur ni goût désagréables, qui contient moins de 1 500 mg/l au total de solides dissous et dans laquelle certains contaminants sont en quantité inférieure à des chiffres spécifiés (OMS Normes

internationales pour l'eau de boisson - 1963). En dehors des normes de pureté chimique, l'eau potable doit aussi répondre à certaines normes de pureté microbiologique.

Toutefois, les normes internationales n'identifient pas tous les contaminants possibles de l'eau, et il en existe beaucoup pour lesquels les limites de sécurité n'ont pas été spécifiées. Ainsi, une eau conforme aux normes internationales peut en réalité être dangereuse et avoir sur la santé des effets nocifs à long terme. Toutefois, on n'a pas la preuve scientifique que des effets de ce genre se soient déjà manifestés. Il ne subsiste que l'inquiétude de les voir apparaître dans l'avenir.

Le nombre des polluants minéraux de l'eau est inférieur à celui des polluants organiques. Les normes internationales pour l'eau de boisson identifient les polluants minéraux les plus importants et recommandent, en ce qui les concerne, des limites de sécurité.

Métaux contenus dans l'eau

Il est possible que des polluants minéraux autres que ceux énumérés dans les normes internationales pour l'eau de boisson apparaissent de temps en temps à des endroits déterminés. Pour ce qui est des dangers présentés par l'industrie, quelque cinquante métaux présentent un intérêt particulier. Les métaux dont le plomb et le mercure sont des exemples restent les plus importants, mais d'autres métaux comme l'arsenic, le béryllium, le cadmium, le manganèse, le chrome, le nickel et le vanadium présentent une importance toxicologique croissante. Le tableau III donne une liste de quelques polluants de l'eau pouvant avoir des effets à long terme.

Le grand public s'inquiète moins des dangers présentés par l'industrie que de ceux qui se manifestent par l'intermédiaire de la nourriture, de l'eau et de l'air urbain pollué. Les effets de ces derniers ne sont pas suffisamment prononcés pour provoquer un état toxique clairement démontrable. Ils sont toutefois à l'origine du dépôt de plusieurs substances dans le corps.

Tableau III

Quelques polluants de l'eau pouvant avoir des effets à long terme

(Liste partielle)

Eléments et substances	Indicateurs
Arsenic : As, en particulier AsO_3	Alkylbenzène sulfonate, ou ABS (indicateur de la pollution par tous les détergents synthétiques)
Barium : Ba	
Cadmium : Cd	Extrait au carbone - chloroforme, ou ECC (comprend la plupart des composés organiques, dont les cancérigènes organiques et les pesticides)
Chlore : Cl_2 (potentiellement toxique en présence de produits de réaction avec les polluants organiques)	Phénol (comprend les phénols, les crésols et produits analogues)
Chrome : CrO_3	
Fluor : F	Poids total de solides dissous, ou TSD (comprend les minéraux contribuant à la "dureté" de l'eau)
Mercure : Hg	
Nitrate : NO_3	Rayonnement bêta brut (indicateur de radio-isotopes divers en l'absence du Strontium 90 et de corps émetteurs de rayons alpha)
Plomb : Pb	
Sélénium : SeO_2 , SeO_3	
Vanadium : V	

/...

Il est possible de démontrer la présence non seulement de substances nécessaires à l'organisme, comme le cuivre, le cobalt, le molybdène, le manganèse et le zinc, mais aussi de substances potentiellement toxiques comme le cadmium, le chrome, le vanadium, le nickel et le plomb. Certaines substances se concentrent aussi dans des organes déterminés, alors que d'autres se répartissent plus uniformément dans le corps. La quantité de certaines substances varie considérablement avec l'âge. La quantité de chrome diminue avec l'âge alors que celle de l'aluminium contenu dans les poumons et du cadmium contenu dans le foie et les reins augmente.

Une pollution spécifique de l'eau par le mercure s'est produite dans les eaux littorales du Japon à la suite de l'évacuation de déchets industriels. Cette pollution a causé indirectement, parmi la population, des maladies et des décès résultant de la consommation du poisson pêché dans ces eaux. Les poissons avaient absorbé une quantité suffisante de mercure présent dans l'eau pour devenir eux-mêmes un aliment toxique. On ne sait pas si l'eau elle-même aurait été toxique, car elle n'est pas utilisée pour la boisson. Cet exemple montre que les polluants de l'eau peuvent parvenir à l'homme dans la nourriture qui provient des eaux polluées.

Ces dernières années, on a émis l'hypothèse que certains métaux normalement présents dans le corps à des concentrations données pourraient contribuer à provoquer des maladies chroniques. D'après cette hypothèse, quelques métaux essentiels formeraient des complexes, par exemple le fer et le cobalt dans les chélates de porphyrine, le hème et la vitamine B 12. Il est possible que certains métaux remplacent d'autres métaux essentiels dans les enzymes métalliques. Ainsi, l'addition d'un métal pourrait créer une carence réelle d'un autre. Par exemple, le cadmium et le mercure s'emmagasinant dans les reins et les testicules pourraient déplacer le zinc par suite de leur chélation avec les radicaux qui s'associent normalement au zinc. Ce n'est là qu'un exemple, mais on pourrait naturellement envisager d'autres mécanismes. On a soulevé la possibilité de la toxicité des métaux-traces devant l'existence de maladies néphrétiques endémiques en Bulgarie, en Yougoslavie et en Roumanie.

Les études épidémiologiques exécutées au Japon, aux Etats-Unis, en Angleterre et en Suède ont montré que les taux de mortalité résultant de maladies cérébro-vasculaires et cardio-vasculaires étaient plus élevés parmi les habitants des régions utilisant une eau décalcifiée que parmi ceux des régions ayant une eau dure.

/...

La quantité de calcium dans l'eau de boisson ne représente que quelques centièmes de celle qui est contenue dans les aliments. Il est concevable que le calcium de l'eau soit associé à d'autres substances, par exemple des éléments-traces ou des composés organiques. Il faut étendre le champ d'activité des études épidémiologiques et essayer en laboratoire diverses substances (par exemple le magnésium) qui pourraient permettre une meilleure compréhension de ce problème.

Les pesticides contenus dans l'eau

Parmi les polluants de l'eau, les pesticides présentent un grand intérêt. Ce groupe de polluants crée une menace nouvelle, non seulement pour les gens qui y sont exposés professionnellement, mais peut-être aussi pour l'ensemble de la population. On peut trouver des pesticides dans l'eau, le sol, les aliments (y compris le lait, les fruits et les poissons vivant dans les eaux polluées) et dans l'air, particulièrement à la campagne, là où ces composés sont utilisés en masse pour les besoins de l'agriculture.

Les pesticides que l'on utilise le plus aujourd'hui sont des composés organiques assez complexes, bien qu'on se serve encore des pesticides à base d'arsenic, de plomb et de mercure. Les pesticides parviennent aux réserves d'eau soit directement, lorsqu'on les emploie pour lutter contre des parasites aquatiques, soit indirectement, lorsqu'ils sont entraînés par le ruissellement des eaux provenant de terres cultivées, ou résultent de traitements aériens faits sans précautions dans des champs voisins, ou de l'évacuation de déchets industriels, ou de transports par l'eau souterraine et les infiltrations.

On est bien renseigné sur les effets toxiques de l'absorption des pesticides organiques. On connaît les effets toxiques aigus et subaigus qu'ils ont sur certains animaux et, dans certains cas, sur l'homme. Si le pesticide est destiné à être utilisé sur des produits agricoles bruts, on aura évalué ses effets toxiques chroniques sur des rats et peut-être sur des chiens, en l'incorporant au régime alimentaire de ces animaux pendant des périodes atteignant deux ans, ou en démontrant qu'il donne, par métabolisme, un ou plusieurs produits dont la toxicité chronique est connue. L'établissement de ces données, qui s'appliquent en général à un niveau d'alimentation ne produisant pas d'effets nocifs décelables sur la santé pendant la période envisagée, constitue en général le stade préliminaire à la détermination du résidu maximum tolérable sur les produits agricoles bruts.

On dispose de certaines données concernant les effets toxiques aigus des pesticides sur l'homme, mais il existe relativement peu d'exemples, dans son cas, d'effets toxiques chroniques.

La toxicité des principaux pesticides est examinée dans l'ouvrage publié par la FAO et l'OMS, intitulé "Evaluation de la toxicité des résidus de pesticides dans les aliments".

Les effets nocifs de très faibles quantités de pesticides ingérés avec l'eau restent encore à démontrer, s'ils existent. En l'absence d'expériences directes sur l'être humain, on doit se fier à celles qui sont effectuées sur des animaux de laboratoire.

La nature de ces expériences variera d'après les pratiques en vigueur dans les différents pays, mais les principes fondamentaux d'un tel travail sont exposés dans la publication de l'OMS intitulée Série des rapports techniques, No 144 (Méthodes d'essai toxicologique des additifs alimentaires). En général, des recherches de ce genre comporteront l'inclusion de pesticides dans la nourriture des rats, et aussi, dans certains pays, dans celle des chiens, ce régime se prolongeant pendant deux ans. On prévoit plusieurs dosages de pesticides dans le régime alimentaire; le dosage le plus faible doit être choisi de façon telle que les animaux ne révèlent aucun effet nocif pendant la période de deux ans. Cette période représente la majeure partie de la vie d'un rat.

Les conclusions suivantes se dégagent des nombreuses expériences faites sur des animaux :

1. Les effets toxiques chroniques du pesticide diminuent lorsque la dose administrée diminue elle-même.
2. Il est possible de fixer une dose faible, mais définissable qui, pendant la durée de vie du rat et pendant deux ans de la vie d'un chien, ne produira aucun effet toxique décelable pouvant se mesurer soit par son influence sur la croissance, le comportement, la durée de vie, la reproduction, et les grandeurs biochimiques et hématologiques, soit sur la base d'un examen pathologique courant ou microscopique.

Ces doses réduites sont appelées "doses sans effet"; aux Etats-Unis, on établit la tolérance à un résidu de pesticide se trouvant sur des produits agricoles bruts déterminés en appliquant à la dose sans effet, une fois celle-ci

/...

reconnue valable, un facteur de sécurité généralement de l'ordre de 100, de manière à tenir compte du fait que l'homme peut être plus sensible au pesticide que les animaux de laboratoire utilisés.

On pourrait objecter que des conclusions tirées d'expériences faites sur des animaux ne s'appliquent pas à l'homme. Toutefois, les effets des médicaments sur l'homme sont conformes aux règles générales déduites d'expériences portant sur les animaux : ils diminuent avec des doses décroissantes et disparaissent pour une dose petite mais définie. De même, la méthode utilisée par la United States Food and Drug Administration pour établir des doses non nocives de résidus de pesticides dans les denrées alimentaires a été fondée sur des expériences pratiquées sur des animaux, et rien ne prouve, jusqu'ici, que cette méthode ait donné lieu à des conclusions nettement erronées.

On connaîtrait bien mieux les effets chroniques des pesticides sur l'homme si l'on pouvait les étudier directement sur lui-même. Toutefois, pour des raisons multiples, on ne saurait, à cet égard, faire des expériences directes, susceptibles de fournir les données les plus intéressantes.

Le risque d'absorption des pesticides est élevé, par exemple chez ceux qui les fabriquent ou qui en établissent les formules, ou qui les utilisent régulièrement. Les personnes qui vivent ou travaillent dans des zones où les pesticides sont utilisés couramment, ou à proximité, peuvent aussi en subir les effets par hasard. Ainsi, on a constaté, parmi les habitants des zones contaminées, des symptômes de sensibilisation et des troubles gastro-intestinaux, respiratoires, nerveux et ophtalmiques.

III. POLLUTION DU SOL

L'ampleur du problème et ses incidences sur la santé

Les déchets solides sont d'origine domestique, industrielle et agricole. En ce qui concerne les déchets domestiques, leur quantité par habitant varie considérablement d'un pays à l'autre suivant le degré de développement et de complexité de l'économie. A Los Angeles, par exemple, le poids total de déchets domestiques solides était en 1962 d'environ 1 400 grammes par habitant et par jour à l'état brut, soit près de 760 grammes par habitant et par jour en poids sec. Par contre, le poids total de déchets solides passant par le réseau d'égouts était inférieur à 200 grammes par habitant et par jour (en poids sec). Cette ville évacue donc, en poids sec, trois fois plus de déchets sous forme solide que sous forme de liquide. Le coût annuel de l'enlèvement et de l'élimination des déchets solides est près du triple de celui du traitement des déchets liquides.

Les déchets solides d'origine domestique peuvent être incinérés, ou servir au compostage, ou être déversés en plein air, enfouis ou déversés dans la mer. Chaque méthode crée des problèmes sanitaires. Seuls les déchets organiques peuvent être éliminés par incinération et compostage, les cendres ou éléments inorganiques devant encore être éliminés. L'incinération, même dans les incinérateurs les plus efficaces, provoque une pollution de l'air, due surtout aux oxydes d'azotes. Le compostage et le déversement des déchets à l'air libre peuvent favoriser la prolifération des mouches, des rats et d'autres vecteurs de maladies. Les déchets organiques enfouis sont susceptibles de décomposition anaérobie, et le méthane et l'anhydride carbonique qui en résultent peuvent entraîner la pollution des eaux de surface. Les déchets déversés dans les dépotoirs marins peuvent être rejetés sur les plages et les polluer.

Les déchets industriels solides ont d'importantes incidences économiques mais, sauf exception, ne présentent généralement pas de danger direct pour la santé. De gros problèmes se posent lorsqu'ils sont incinérés ou s'enflamment spontanément, aggravant ainsi la pollution atmosphérique, ou lorsque la pluie les dissout, ce qui amène une pollution des eaux souterraines ou de surface. Les résidus de

de l'exploitation du charbon par excavateurs, les crassiers et les terrils sont autant d'exemples de déchets industriels solides qui dégradent le sol et le rendent impropre à maints usages. La nécessité d'éliminer les déchets radioactifs solides des réacteurs et des installations de recherches nucléaires en les enfouissant dans la terre ou en les déversant dans la mer pose également de graves problèmes.

En théorie, les déchets agricoles solides ne devraient pas contribuer à la pollution du milieu, car les matières végétales retournent normalement au sol. Toutefois, la concentration de ces déchets aux points de chargement, dans les conserveries ou les usines de conditionnement et dans les aires d'entreposage a créé des difficultés. Dans ces divers endroits, d'énormes accumulations de débris organiques peuvent se décomposer, subir l'action des eaux de pluie, attirer des vecteurs de maladie, etc., et polluer ainsi le milieu.

Contamination chimique du sol

La pollution chimique du sol résulte d'une contamination involontaire ou accidentelle par des produits chimiques artificiels. Les polluants peuvent atteindre l'homme par l'intermédiaire des eaux souterraines, des eaux de ruissellement et des eaux de drainage, ainsi que des plantes alimentaires ou des plantes fourragères dont se nourrissent les animaux domestiques et, dans une moindre mesure, les animaux sauvages consommés par l'homme. Aussi les polluants doivent-ils être solubles dans l'eau et entrer dans l'humidité du sol ou dans les eaux d'infiltration. Les végétaux peuvent tirer leur humidité de l'une ou l'autre source. Les graines enrobées de pesticides peuvent être picorées par les oiseaux et leur nuire, et les résidus insolubles recouvrant la végétation peuvent être ingérés par le bétail.

Le sol contient de nombreuses substances inorganiques et organiques solubles dans l'eau. Il s'agit des produits de la désagrégation et de la décomposition des minéraux et de la dégradation des matières organiques. Sous l'action microbienne, ces substances sont transformées par oxydation, généralement en oxydes inorganiques, encore que certains composés organiques atteignant les eaux souterraines dépourvues d'oxygène puissent ne pas être entièrement oxydés. On trouve des substances humiques jusque dans les eaux de la meilleure qualité, ainsi que de faibles

quantités d'"éléments-traces". Les éléments ainsi apportés au sol proviennent de l'air - par exemple l'iodure contenu dans les petites gouttelettes d'eau de mer - ou des déchets de la combustion des combustibles fossiles.

Les engrais servent à améliorer le sol aux fins de la culture, mais leurs impuretés peuvent contaminer le sol. L'irrigation des terres cultivables et des vergers peut avoir un effet polluant lorsque la source d'eau est polluée par des déchets industriels contenant des produits chimiques organiques synthétiques.

Au cours de ces dernières décennies, on a intentionnellement modifié les sols à usage agricole, horticole et sylvicole au moyen d'herbicides, d'insecticides, de fongicides, d'engrais et de fumigènes. Les produits chimiques utilisés peuvent polluer accidentellement les eaux du sol. Le sol doit être considéré comme une communauté vivante de champignons, de bactéries, de protozoaires et de métazoaires. Les fumigènes et les engrais sont instables et soumis à des transformations métaboliques par les micro-organismes du sol. C'est ainsi que, même les dérivés chlorés du phénol, tels que les acides de polychlorophénoxyacyl utilisés comme herbicides, entrent dans le métabolisme de certaines variétés de bactéries qui, par adaptation, s'en nourrissent. C'est également le cas pour le DNOC (dinitroorthocrésyl) et les composés qui lui sont apparentés. Il convient d'ajouter que la flore bactérienne et les champignons du sol sont plus abondants que la flore aquatique, même lorsqu'il y a contamination par des matières organiques. Dès lors, il est tout à fait possible que des composés chimiques pouvant rester longtemps stables dans l'eau soient dégradés rapidement dans le sol par l'activité microbienne. On sait par exemple que si l'on "nourrit" un sol au moyen de produits chimiques tels que les phénols, les bactéries qui prospèrent sur le phénol naturel vont proliférer.

L'expérience acquise avec de nouveaux médicaments antibactériens montre à quel point certaines bactéries réussissent à accroître leur résistance à de nouvelles substances. Les enzymes métaboliques subissent les transformations qui leur sont nécessaires pour détoxifier les composés; on parle alors de formation d'enzymes d'adaptation. Sous l'action de ces mécanismes, les produits chimiques sont éliminés du sol et chaque année, il faut pulvériser des herbicides sur les terrains de culture si l'on veut empêcher la prolifération des mauvaises herbes.

L'idéal serait d'employer uniquement les produits chimiques qu'on sait être facilement attaqués et dégradés par les micro-organismes communs du sol. Les composés de plomb et de mercure - les produits mercuriels étant pour la plupart des composés organiques - et les sels d'acides arsénieux sont plus susceptibles de former dans le sol des accumulations de contaminants persistants et d'introduire du plomb, du mercure et de l'arsenic dans les produits végétaux.

En ce qui concerne la fabrication de pesticides à usage agricole, la tendance actuelle est de synthétiser des composés peu durables et dégradables, de manière à atténuer la persistance des résidus de pesticides et des produits de leur dégradation sur les cultures alimentaires et fourragères.

Actuellement, les seuls pesticides organiques qui résistent à la dégradation bactérienne et ne produisent pas de résidus inertes sont les hydrocarbures chlorés, comme le DDT, le lindane, l'aldrine, et la dieldrine. Les résidus de ces pesticides stables semblent être fixés ou adsorbés sur les particules de terre composées de minéraux inorganiques enrobés de composés organiques. Ces produits chimiques peuvent contaminer les plantes à racines comestibles cultivées dans de tels sols; c'est ainsi que le lindane peut gâter les carottes ou les betteraves. Le comportement des produits chimiques qui n'affectent pas la qualité ou le rendement des cultures n'attire pas toujours l'attention, mais il paraît peu vraisemblable que, dans des conditions normales, les végétaux absorbent et assimilent complètement ces polluants.

Par ailleurs, on a constaté que les eaux filtrant des sols contaminés par des hydrocarbures chlorés contenaient de faibles quantités de ces substances. Elles sont probablement absorbées par l'humus du sol (lequel contient des lipides) et incorporées aux eaux présentes dans le sol. Il est possible, mais non certain, que l'homme absorbe ces substances par l'intermédiaire de l'eau de boisson, provenant de ces sols. On a démontré la présence de ces substances en les extrayant de l'eau grâce à de puissants solvants organiques. Les quantités ainsi extraites sont de l'ordre de quelques microgrammes par litre. Pareilles quantités ne sont probablement pas toxiques pour l'homme.

Les observations portant sur la contamination des terrains de culture situés dans le voisinage d'usines chimiques ont indiqué qu'il existe un danger potentiel de retombées des fumées dégagées par les cheminées desdites usines. Toutefois, cela ne concerne que les contaminants inorganiques. Les produits chimiques organiques synthétiques sont détruits dans les cheminées dont le fonctionnement est adéquat.

Alors que les déchets gazeux entrent dans l'atmosphère et que les déchets liquides sont généralement éliminés dans les eaux de surface, les déchets solides sont habituellement déversés sur le sol ou enfouis. Certains déchets solides sont déversés dans les eaux de surface, provoquant ainsi leur pollution, et d'autres sont incinérés, une bonne partie étant ainsi transformée en déchets gazeux; d'autre part, certains déchets liquides sont répandus sur le sol et d'autres sont injectés dans les couches sous-jacentes du sol. Dès lors, la terre reçoit la plus grande partie des déchets solides et quelques polluants liquides.

Projets de recherche

Généralités

Les recherches sur la pollution du milieu doivent englober à la fois la recherche pure et la recherche appliquée. Il est particulièrement nécessaire d'effectuer des recherches sur l'application de principes connus à des situations particulières, notamment dans les pays en voie de développement.

La pollution semble être une conséquence inéluctable de la technique industrielle moderne, de la rapidité et de la commodité des transports et du confort des habitations, mais si elle devient excessive, elle risque d'affecter la santé de l'homme ainsi que son bien-être mental, social et économique. Dès lors, le problème consiste à déterminer le niveau de pollution permettant un développement économique et social optimal sans compromettre la santé dans son sens le plus large. On peut y arriver par l'application systématique des connaissances actuelles, complétées par les résultats de projets de recherche judicieusement choisis.

En ce qui concerne les nouveaux produits chimiques organiques synthétiques, il est urgent d'étudier chez l'homme, de manière approfondie, l'ingestion de

quantités relativement peu élevées de substances potentiellement dangereuses pendant une longue période. Les données recueillies actuellement par des analyses biologiques pratiquées sur divers organismes aquatiques, ne sont pas directement applicables à l'homme. Par exemple, les poissons peuvent absorber et libérer des substances toxiques sans nécessairement les soumettre à des transformations métaboliques. Les accidents, par ailleurs si utiles pour déterminer les niveaux de toxicité aiguë dans l'industrie, ne permettraient pas nécessairement de dégager beaucoup de données sur l'empoisonnement chronique. Actuellement, les tests de détermination de l'intoxication chronique chez les animaux de laboratoire sont normalement effectués sur des groupes d'animaux relativement restreints par rapport aux populations humaines susceptibles d'être exposées. Par conséquent, les effets de faible incidence ne seraient pas détectés. En outre, il n'est guère probable que les études effectuées sur les animaux mettent pleinement en lumière les effets qu'exercent les substances toxiques sur l'homme. Il est possible que les substances toxiques aient un effet synergique et cumulatif, et c'est là un point qu'il convient d'étudier.

Dans les conditions actuelles, il est possible de mettre à profit l'expérience acquise en matière d'hygiène industrielle, particulièrement dans le cas où les données toxicologiques sur lesquelles reposent les normes industrielles comprennent les résultats d'expériences de nutrition effectuées sur des animaux ainsi que d'observations sur les réactions de groupes importants de population exposée.

Il y aurait lieu d'entreprendre des études épidémiologiques sur des groupes de personnes soumises à une exposition professionnelle ou vivant dans des régions fortement exposées, afin de déterminer les signes subjectifs et objectifs des effets toxiques chroniques. Dans le cadre de ces études, il faudrait mesurer les niveaux de pesticides et de métabolites présents dans les tissus dont on dispose, à savoir les spécimens d'hôpitaux et d'autopsies. Il faudrait mettre ces niveaux en regard des changements de l'activité enzymatique, ainsi que des modifications des fonctions ophtalmiques, auditives, neurales, musculaires et respiratoires, et déterminer en particulier s'ils produisent des effets sur les tissus d'animaux de laboratoire.

Bien qu'il semble, d'après les connaissances actuelles, que l'accumulation de pesticides dans les tissus humains s'arrête lorsqu'on atteint un seuil relativement

peu élevé, on pourrait entreprendre des études épidémiologiques prospectives en vue de détecter, chez des groupes de personnes fortement exposées aux pesticides, les maladies imputables à des anomalies dues au métabolisme des hydrates de carbone ou des lipides, la diathèse hémorragique par coagulation, et les désordres du métabolisme protéique ou minéral. Il serait indispensable, dans ce cas, de disposer de groupes témoins.

Recherches sur la mutagénicité et la cancérogénicité liées à la pollution de l'air, des eaux et des aliments

Mutagénicité

La mutagénicité peut avoir sur la santé des effets à long terme de trois ordres au moins :

La mutation des cellules somatiques peut entraîner l'apparition de nouveaux types de cellules (non malignes) différentes des cellules normales. Si le fonctionnement normal de ces cellules est affecté ou si elles compromettent l'intégrité de l'organe, ces mutations constituent une forme de pathogénésie.

Nombreux sont ceux qui voient dans la mutation des cellules somatiques le mécanisme par lequel les cellules normales deviennent malignes.

Lorsque des mutations non létales se produisent dans les cellules reproductrices de l'organisme géniteur, les générations suivantes peuvent être marquées par des effets génétiques. Le résultat est particulièrement important là où de forts groupes de population sont affectés par des polluants largement répandus dans le milieu. Chaque mutagène chimique peut provoquer des mutations qui lui sont propres et qui s'ajoutent à celles imputables à d'autres facteurs. Aussi y a-t-il lieu d'évaluer dans leur ensemble des incidences génétiques de tous les facteurs de mutation.

Nombre d'agents chimiques sont capables de produire des effets mutagènes dans un système biologique ou dans un autre. Ce qui ne veut pas dire que, dans les conditions d'exposition réelle, ces substances produisent des mutations avec une fréquence significative.

Au nombre des mutagènes particulièrement actifs, on note certains agents alcoylants, certains "antimétabolites" et d'autres substances chimiques qui par leur structure sont apparentées aux bases de l'acide nucléique. Nombre de composés

capables de modifier l'acide nucléique mais permettant malgré tout la reproduction, provoquent peut-être des mutations. Dans un rapport précédent de l'OMS (Organisation mondiale de la santé, série des Rapports techniques, 248) on trouvera une liste des substances chimiques mutagènes, dont celles que l'on peut trouver dans le milieu humain. Le problème y est étudié de manière approfondie.

On peut facilement effectuer des tests de mutagénicité des agents chimiques sur des formes simples de vie comme les phages et les bactéries. Toutefois, comme le point d'entrée, le transport et le métabolisme jouent probablement un rôle important dans la détermination de la dose effective de mutagène, il faut confirmer ces tests par l'étude des mêmes facteurs biochimiques dans des organismes supérieurs avant de pouvoir évaluer la probabilité du risque. En outre, certaines substances qui ne sont pas mutagènes en soi peuvent être transformées en mutagènes par métabolisme. Pour ces raisons, il conviendrait d'étendre aux mammifères l'évaluation des polluants potentiellement mutagènes.

Il faudra sans doute procéder à des études sur la population. Toutefois, ces études poseront de graves problèmes, car il est difficile de mesurer les effets sur les générations suivantes, et surtout de définir le degré d'exposition réelle des parents aux innombrables facteurs mutagènes.

Cancérogénicité

L'exposition professionnelle, qu'il s'agisse de l'activité du ramoneur ou de la fabrication des produits chimiques à base de chrome, a fait l'objet d'études détaillées et bien documentées qui ont établi la réalité et la gravité des conséquences de l'exposition aux substances chimiques cancérogènes. Chaque organe du corps, ou presque, peut réagir par une tumeur à un agent chimique. Si, dans certains cas, c'est le tissu directement exposé qui réagit (par exemple le poumon sous l'action des substances chimiques à base de chrome, ou la peau sous l'action du goudron de houille), il peut arriver que la tumeur se développe dans un organe éloigné. Un exemple en est l'apparition du cancer de la vessie à la suite d'une exposition à certains amines aromatiques qui entrent dans le corps principalement par la peau et les poumons. Les effets des substances chimiques cancérogènes, quels

que soient leurs points d'entrée, sont souvent cumulatifs; aussi faut-il étudier l'ensemble du circuit d'exposition : l'eau, l'air et les aliments. Comme la cancérogénésie due aux agents chimiques est généralement une conséquence de l'interaction de divers facteurs, le problème s'en trouve compliqué d'autant. C'est ce qu'illustre particulièrement bien l'exemple classique de l'induction en deux temps du cancer de la peau. En l'occurrence, l'exposition à une dose d'hydrocarbure polynucléaire, incapable en soi de produire le cancer, provoque fréquemment un cancer de la peau lorsqu'elle est suivie d'un contact avec un produit qui en favorise l'apparition, à savoir l'huile de croton, qui elle non plus n'a pas d'effets cancérogènes. Parmi les autres facteurs entraînant des altérations, on citera les maladies antérieures (lésion consécutive au cancer du poumon) ou les infections (virus de la grippe; essence ozonisée). Dans certains cas, l'exposition simultanée à d'autres agents toxiques peut affaiblir la capacité d'éliminer un agent cancérogène. On citera à cet égard les lésions de l'appareil respiratoire provoquées par la fumée de tabac. En bref, pour évaluer les effets des expositions cancérogènes, il faut examiner non seulement les nombreuses sources possibles, mais également le rôle des facteurs qui renforcent l'action cancérogène.

Ce sont les études épidémiologiques sur des groupes professionnels qui ont produit les renseignements les plus probants concernant les risques d'induction du cancer chez l'homme par des substances chimiques. Les études effectuées sur des groupes exposés à des polluants ordinaires du milieu n'ont pas abouti à des résultats aussi concluants. C'est ainsi qu'il n'est pas certain que les hydrocarbures polynucléaires comme le benzo(a)pyrène produisent le cancer du poumon. Bien que certains indices tendent à prouver que ces substances contribuent quelque peu à l'apparition de ce cancer, on ne peut encore trancher cette question. A cet égard, l'attention s'est portée sur plusieurs autres polluants atmosphériques, notamment sur les composés organiques non aromatiques. Le rôle que joue le benzo(a)pyrène dans la pollution du milieu a suscité un grand intérêt; on en a constaté la présence non seulement parmi les polluants atmosphériques, mais également dans les aliments fumés et dans les sols, et l'on sait que diverses sources en libèrent dans les réseaux de distribution d'eau. Les quantités de cette substance contenues dans ces sources

présentent un intérêt, mais on ne peut interpréter ces constatations, faute de savoir si les concentrations observées ont un effet chez l'homme. Pour résoudre ces problèmes, il faudra effectuer des études épidémiologiques et en laboratoire.

Les études épidémiologiques ont permis de constater des écarts sensibles entre les fréquences relatives des tumeurs de divers organes dans divers groupes de population. Etayés par des cas précis d'exposition, ces premiers indices pourraient aider à déterminer les facteurs étiologiques.

Les expériences de laboratoire complètent utilement les études épidémiologiques lorsqu'il s'agit d'identifier les causes de la maladie. Toutefois, ces expériences sont particulièrement importantes dans la mesure où elles permettent de prévoir les dangers que font courir de nouvelles substances avant même qu'on les utilise. Ce genre d'expérimentation a connu une réussite spectaculaire : en effet, on a pu découvrir que le composé acétylaminofluorène, que l'on se proposait d'utiliser comme insecticide, était une substance cancérigène puissante. Toutefois, malgré de pareils succès, les méthodes d'expérimentation actuelles sont loin d'être satisfaisantes, que ce soit sur le plan de la fiabilité ou de la commodité. La plupart d'entre elles impliquent l'examen de groupes relativement importants d'espèces animales pendant la vie entière ou une grande partie de la vie des animaux.

Plusieurs facteurs limitent l'utilité de telles expériences. Premièrement, il a été démontré que dans bien des cas, l'espèce considérée joue un rôle décisif dans l'apparition de la tumeur. Les différences existant entre les espèces quant aux transformations métaboliques des substances cancérigènes provoquent des réactions différentes, et il ne suffit pas de faire des expériences sur un plus grand nombre d'espèces.

Les tests effectués sur les animaux de laboratoire doivent donc toujours être corroborés par des études parallèles sur le métabolisme humain.

Deuxièmement, les groupes les plus importants qu'il est possible d'utiliser dans la plupart des études pratiques en laboratoire sont beaucoup plus restreints que les groupes de population exposés. En conséquence, il y a lieu de ramener par extrapolation les hauts niveaux d'incidence à des niveaux inférieurs. D'une part,

la détermination de seuils de sécurité est difficile en l'absence de principes généraux applicables à ce genre d'extrapolation. D'autre part, la méthode qui se fonde sur l'hypothèse qu'il n'existe pas de seuil est peut-être trop prudente. Dès lors, pour contribuer à la détermination de seuils de sécurité, il y a lieu d'effectuer quelques expériences à grande échelle (portant sur de grands groupes d'animaux) afin d'aider à définir les principes généraux régissant cette extrapolation.

Troisièmement, dans de nombreux cas, les facteurs secondaires qu'on a notés plus haut (maladies, lésions, etc.,) peuvent jouer un rôle décisif dans la détermination du risque. S'il est manifestement impossible d'envisager systématiquement les nombreuses variables possibles, il y a lieu de tenir compte de ces considérations dans la préparation des expériences. Deux conclusions s'imposent. Il faut encourager l'expérimentation sur des mélanges de substances analogues à ceux qu'on rencontre dans la réalité, parallèlement aux expériences sur les substances pures. De même, dans la mesure du possible, il faut tenir compte, dans la préparation de ces études, de tous les facteurs qui favorisent la maladie.

On a envisagé un grand nombre d'expériences de courte durée pour examiner les substances potentiellement cancérogènes : ablation des glandes sébacées, agrandissement des nucléoles, étude des réactions dans des systèmes simples (cultures de tissus, mucosités et paramécies), tests biochimiques portant par exemple sur les interactions de ces substances et de l'acide nucléique, etc. Ces tests ont joué un rôle utile dans les examens comparatifs de l'activité de composés chimiquement semblables. Toutefois, tous ont échoué lorsqu'on les a étendus à toute une série de substances chimiques.

Par ailleurs, ces expériences ne tiennent pas compte des mécanismes du traitement biochimique (entrée, emmagasinage et métabolisme) qui peuvent jouer un rôle décisif dans la détermination de la dose agissante. Le moins que l'on puisse faire pour confirmer l'interprétation des résultats de ces expériences accélérées est d'effectuer des études sur le métabolisme humain.

Pollution atmosphérique

Méthodes de recherche sur la pollution atmosphérique

a) Etudes expérimentales. De nombreux chercheurs donnent la priorité à la mise au point de méthodes simples et rapides en vue d'obtenir des indices valables de pollution destinés à servir dans le cadre d'études épidémiologiques ou autres. Certaines de ces méthodes manquent de spécificité et leur application peut aboutir à des conclusions erronées. Les méthodes permettant d'évaluer la pollution d'après la densité optique de la tache produite sur un papier filtre exigent de fréquents étalonnages gravimétriques. Il est souhaitable de disposer d'instruments qui enregistrent la concentration de polluants à intervalles rapprochés, de manière à pouvoir évaluer les effets des poussées aiguës de pollution. Certains végétaux et animaux inférieurs étant plus sensibles que l'homme à de faibles concentrations de certains polluants atmosphériques, on peut s'en servir comme d'"indicateurs biologiques", qui complètent ou remplacent à peu de frais et avec précision des instruments de mesure complexes. Il ne faut pas oublier que le bien-être de l'homme peut être compromis si l'on utilise sans discernement les résultats obtenus à partir d'indicateurs biologiques.

De toute évidence, il est préférable d'étudier l'exposition de volontaires humains à des concentrations réelles de polluants urbains, pris séparément et en mélange, plutôt que de soumettre des animaux à des expositions massives. Bien que l'étude des effets d'expositions réelles sur les divers aspects de la fonction pulmonaire soit incontestablement utile, il convient d'encourager la réalisation d'expériences portant sur d'autres effets; c'est ainsi qu'il peut être bon d'étudier les effets qu'exercent sur la flore bactérienne les nombreux contaminants solides et gazeux présents dans l'atmosphère des villes.

b) Etudes sur place. Des études appropriées peuvent mettre en lumière de la façon la plus probante le lien qui existe entre la mortalité ou la morbidité, d'une part, et la pollution atmosphérique, d'autre part. Toutefois, pour donner des résultats satisfaisants, ces études doivent reposer sur des indices précis de santé et de pollution domestique et industrielle. On ne peut donc les effectuer que dans les collectivités qui disposent des moyens nécessaires pour établir ces indices.

i) Indices de pollution. Quelques projets de recherche exigeront peut-être qu'on mesure divers polluants, mais il y aurait lieu d'adopter, au niveau national ou, de préférence, par accord international, certains paramètres pour les usages courants. En outre, il faudrait adopter des techniques de mesure normalisées. Grâce aux paramètres et aux techniques normalisés, il devrait être possible de recommander des procédés d'échantillonnage pour divers types de régions, tels que les centres commerciaux des villes, les zones où existent des industries légères ou lourdes, les centres résidentiels (avec différentes densités d'habitations) et les zones où les règlements de lutte contre les fumées sont strictement appliqués. En mettant ces procédés au point, il faut également tenir compte de la topographie et de l'aération naturelle des zones intéressées. On espère que les résultats faciliteront les comparaisons entre les différents types de zones.

ii) Indices de mortalité et de morbidité. Il convient de choisir avec soin des indices adéquats de mortalité et de morbidité. Certaines catégories de personnes, comme les travailleurs, les militaires, les policiers et, dans de nombreux pays, les enfants, sont très saines et peuvent de ce fait être particulièrement résistantes aux effets de la pollution atmosphérique. On a constaté que dans les grandes agglomérations, les indices reposant sur le nombre total de décès ou d'admissions dans les hôpitaux ou sur les demandes de prestations d'assurance-maladie étaient très sensibles. Dans les petites localités, toutefois, des fluctuations accidentelles peuvent atténuer les effets et rendre nécessaire le choix d'autres méthodes. En pareil cas, les relevés journaliers comme ceux qui sont effectués par le Service de recherche sur la pollution atmosphérique du Conseil de la recherche médicale, les indices fondés sur les dossiers établis par des omnipraticiens après leur première entrevue avec des patients souffrant d'affections respiratoires aiguës, semblent offrir les perspectives les plus intéressantes. Toutefois, la population de certaines agglomérations peut être trop restreinte pour permettre la réalisation d'études satisfaisantes sur place.

iii) Effets à long terme de la pollution. D'une manière générale, on s'accorde à reconnaître que les effets à long terme de la pollution sur l'homme sont plus importants que les réactions aiguës. Les recherches épidémiologiques

en la matière supposent des comparaisons entre des groupes de type différent, et dès lors, il est difficile, voire impossible, de ne pas tenir compte des effets d'autres facteurs. Il faut donc se montrer très prudent pour tirer des conclusions des résultats de ces études. On peut admettre qu'il existe un lien positif entre la bronchite chronique et la pollution atmosphérique, mais il est moins certain qu'il en existe un entre le cancer du poumon et la pollution; en fait, ce lien est ténu si on le compare à celui qui existe entre cette maladie et l'usage du tabac. A l'avenir, les recherches devront comprendre des études prospectives, de manière à établir une corrélation entre ces facteurs et les variations futures de la pollution atmosphérique.

iv) Effets immédiats ou aigus de la pollution atmosphérique. Les effets immédiats sont plus faciles à étudier au moyen de techniques épidémiologiques, et il est maintenant possible d'établir un rapport quantitatif entre la morbidité imputable à des affections respiratoires et la mortalité en général, d'une part, et des niveaux déterminés de pollution atmosphérique dans certaines agglomérations, d'autre part. Peut-être pourra-t-on ainsi faire des comparaisons entre les effets aigus de la pollution dans diverses localités et entre divers mélanges de polluants dans une même localité.

c) Sujets particuliers d'études à faire sur place. Parmi les problèmes particuliers qu'il faut résoudre au moyen d'études sur place, on peut citer : l'influence d'épidémies graves d'infections respiratoires sur les effets qu'exerce la pollution atmosphérique au point de vue de la santé; les effets sur la santé de très courtes périodes de forte pollution; et l'évaluation de l'utilisation des combustibles, compte tenu notamment de l'exploitation de grandes centrales d'énergie.

d) Rôle des méthodes statistiques et épidémiologiques dans les études faites sur place. De plus en plus, l'épidémiologie et la statistique permettent de faire face à la complexité des données et des études sur la santé, et il faut réévaluer périodiquement le rôle qu'elles peuvent jouer, de manière à déterminer quelles techniques nouvelles sont susceptibles d'améliorer les méthodes employées pour étudier sur place la pollution atmosphérique.

Pollution des eaux

Recherches sur la pollution des eaux

Ces dernières années, on a constaté dans plusieurs pays une multiplication remarquable des recherches sur la pollution des eaux effectuées dans divers laboratoires gouvernementaux, universitaires et privés. Les procédés d'échantillonnage, de collecte, d'identification et de dosage des contaminants organiques et inorganiques sont revus et perfectionnés fréquemment, et l'on expérimente de nouveaux paramètres pour l'évaluation du degré de pollution. En étudiant le benthos, le plancton et d'autres organismes aquatiques et en effectuant des tests sur leurs réactions physiologiques, biochimiques et écologiques à divers degrés d'exposition, on poursuit les recherches concernant l'évaluation des effets de la pollution sur la qualité des eaux; ces études pourraient également permettre d'identifier des paramètres biologiques susceptibles de simplifier l'évaluation du degré de pollution.

Des études épidémiologiques sont toujours en cours sur les effets pour la santé de certains agents biologiques et de certains solides dissous contenus dans les eaux polluées et éliminés partiellement par des procédés classiques, et on ne peut encore tirer à cet égard aucune conclusion définitive. Les recherches visant à perfectionner les méthodes de lutte contre la pollution comprennent des études sur l'origine de divers types de détritiques et sur le degré de pollution imputable à l'évacuation des eaux usées dans les villes et dans les campagnes. On a reconnu que, dans de nombreux cas, les procédés mécaniques et biologiques classiques sont impuissants à faire disparaître certains contaminants et qu'il faut améliorer les méthodes employées pour éliminer les polluants potentiels des déchets liquides; on a donc recherché de nouveaux procédés de traitement et l'on a déjà accumulé une expérience considérable touchant les méthodes de séparation de nombreux polluants chimiques, biologiques et radiologiques. Dans la majorité des cas, on a appliqué des principes physicochimiques connus, tels que l'adsorption, l'électrodialyse, l'échange d'ions, l'oxydation, etc. Les résultats de certains de ces nouveaux procédés sont prometteurs, mais leur coût constitue encore un obstacle majeur, sauf dans le cas d'opérations spéciales intermittentes.

Des rapports détaillés concernant ces recherches et des sujets connexes sont publiés régulièrement dans diverses publications scientifiques.

Recherches en cours

Dans les recherches sur les effets des pesticides, les concentrations de matières à identifier et à déterminer sont souvent très faibles, parfois de l'ordre de 1 partie par 10¹¹. L'identification et la détermination ne sont possibles que par l'application de méthodes modernes faisant appel à des instruments (chromatographie en phases gazeuse et spectrophotométrie infrarouge notamment). Il est donc indispensable de disposer d'un matériel coûteux, ainsi que des services de spécialistes formés à son maniement. Pour étudier le problème dans ses moindres aspects, il faut faire appel à des méthodes encore plus perfectionnées et certainement plus coûteuses. Il est évident qu'à l'heure actuelle, peu de laboratoires sont outillés pour effectuer ce genre d'analyses. Néanmoins, on a progressé rapidement ces dernières années. La question suscitant un intérêt croissant, on peut s'attendre à ce que cette tendance se confirme.

Aux Etats-Unis, on a suivi la méthode réaliste qui consiste à examiner la biocoénose^{1/} de certains habitats et à tenter d'évaluer les effets des pesticides sur les différents maillons de la chaîne alimentaire qu'elle représente. Au Royaume-Uni, on envisage d'appliquer la même méthode. Toutefois, il convient de mentionner que, bien que l'étude de la pollution aquatique se poursuive depuis des années, ce nouveau problème entraîne une augmentation du nombre des disciplines nécessaires à la constitution d'une équipe de chercheurs bien équilibrée. Par exemple, si les oiseaux piscivores sont les premiers maillons de la chaîne alimentaire à être affectés de façon sensible, l'équipe doit comprendre un ornithologue. Il est également prouvé que de nombreuses substances importantes sont adsorbées sur des particules insolubles; elles peuvent donc sans aucun doute être ingérées par des invertébrés vivant au fond de l'eau et entrer ainsi dans la chaîne alimentaire. Par conséquent, il faut tenir compte de l'influence du régime hydraulique des cours d'eau sur le dépôt et l'érosion des sédiments. Il faudra étudier tout particu-

1/ Une biocoénose est une unité écologique comprenant la flore et la faune d'un habitat.

lièrement les eaux stagnantes (lacs, réservoirs) du fait qu'il peut se produire, par stratification et sédimentation, des accumulations locales de matières non dissoutes ou dissoutes et que la vitesse de dilution diminue avec la profondeur.

Il est établi que divers organismes, notamment les poissons, sont affectés à des degrés différents par les divers pesticides organiques synthétiques. Cela rend le problème d'autant plus complexe et restreint considérablement la possibilité d'utiliser une seule espèce comme organisme témoin universel permettant d'évaluer le niveau de pollution microchimique dans un milieu et ses effets écologiques.

La complexité actuelle des méthodes chimiques et physiques d'identification et de détermination des contaminants microchimiques soulève une difficulté particulière lorsqu'il s'agit d'effectuer des études sur place dans des régions isolées. On s'efforce donc de mettre au point d'autres procédés, notamment des méthodes spécialisées d'analyse biologique, domaine dans lequel on a enregistré des progrès notables. Les types de réaction des organismes à des concentrations sublétales de substances toxiques varient considérablement, et les chercheurs croient qu'on peut prendre nombre de réactions biologiques comme base des méthodes d'analyse biologique. On citera par exemple la croissance des cellules des algues, le rythme respiratoire, l'acquisition de réactions de fuite et le niveau de fécondité. On espère que si ces résultats se confirment, il sera possible de mesurer non seulement le niveau relatif de pollution microchimique d'une eau déterminée, mais encore - dans une certaine mesure au moins - la nature des contaminants en cause. Les résultats de certains travaux publiés indiquent que la mesure des effets de substances organiques synthétiques sur le rythme de croissance des cultures d'algues permettra peut-être de dégager des renseignements utiles. Les recherches en la matière connaissent actuellement un développement poussé, et l'on fait observer que la normalisation prématurée des méthodes d'analyse biologique ou des organismes témoins pourraient entraver les progrès futurs plutôt que les accélérer. Enfin, on fait valoir que pour élaborer des méthodes efficaces de détection, d'identification et de surveillance de la pollution microchimique, on doit disposer de données fondamentales sur l'écologie du milieu aquatique considéré. Ce n'est guère le cas actuellement, et là où les circonstances le permettent, il ne faut épargner aucun effort pour rassembler ces données.

Autres études épidémiologiques chez l'homme

On a utilisé de nombreuses données de la médecine du travail et les résultats d'expériences portant sur plus de 350 substances pour mettre au point des normes d'exposition aux risques professionnels. Ces renseignements peuvent être extrêmement précieux dans le choix des méthodes de recherche sur la pollution atmosphérique et des critères permettant d'établir des normes de pollution atmosphérique pour la population. Il convient de ne pas extrapoler pour appliquer à l'ensemble de la population les normes de pollution atmosphérique applicables à certains groupes professionnels, car l'exposition des diverses populations peut faire l'objet de variations importantes.

Utilisation de données professionnelles pour évaluer les risques qu'encourt la population

Il serait possible d'obtenir des renseignements beaucoup plus nombreux sur les effets à long terme de certains polluants du milieu, dont certains groupes professionnels absorbent de plus fortes doses, si les dossiers des divers groupes professionnels faisaient l'objet d'une analyse plus systématique. Une telle analyse requiert une collaboration plus étroite entre le médecin du travail, l'ingénieur sanitaire, l'épidémiologiste et le biostatisticien. Pour pouvoir tirer le meilleur profit de ces renseignements et d'autres renseignements, il faut mettre au point un système uniforme de registres, dans lesquels seront indiqués les changements de profession, le lieu de résidence, les périodes de maladie et la cause du décès. Tout cela était jusqu'ici impossible à l'échelon national, pour des raisons techniques mais ne l'est plus depuis l'invention des ordinateurs. Il serait donc possible de suivre les taux de morbidité et de mortalité des groupes dont on sait qu'ils sont exposés à certains polluants ou groupes de polluants. Créer de tels fichiers, et en faciliter l'accès, serait l'une des meilleures méthodes épidémiologiques que l'on pourrait employer pour étudier une large gamme de problèmes médicaux.

Aux Etats-Unis, les Social Security Records (BOASI) qui n'ont pas été créés dans cette intention, se sont révélés très utiles pour la recherche en matière de médecine du travail, notamment pour les études de cohortes. Au Royaume-Uni, le Ministry of Pensions and National Insurance Morbidity Survey rend possible une étude, à l'échelon national, sur les professions et le lieu de résidence ainsi que sur diverses maladies imputables à des phénomènes de pollution. Dans certains pays scandinaves, des dossiers très circonstanciés sur la population sont tenus à jour depuis plusieurs décennies; ils comprennent déjà des données sur la morbidité. Grâce à tous ces renseignements, il sera possible d'effectuer d'autres recherches épidémiologiques.

Utilisation de données fournies par les hôpitaux et les dispensaires. On peut étudier les effets à long terme de la pollution du milieu sur le système respiratoire en utilisant davantage les dossiers médicaux des hôpitaux et des dispensaires (relatifs aux malades hospitalisés ou non hospitalisés) ainsi que les rapports pathologiques. On a constaté que, dans les zones où la pollution atmosphérique est plus forte, l'incidence de certaines maladies transmissibles ou infectieuses chez les enfants et la population active est plus élevée. Dans certains endroits, on pourrait tirer des dossiers des malades admis dans les hôpitaux et des malades non hospitalisés davantage de renseignements sur la fréquence des affections inflammatoires chroniques de la gorge et des bronchites chroniques, ainsi que des maladies cardio-pulmonaires. Les possibilités qu'offrent de telles recherches ne sont pas toutes utilisées et il conviendrait d'encourager le développement des activités dans ce domaine. On a besoin, par ailleurs, de critères plus explicites et plus uniformes pour les diagnostics d'examens cliniques aussi bien que pathologiques, ainsi que de données plus précises et plus uniformes sur l'exposition, notamment sur le type et la densité de polluants, la durée et le type d'exposition, et des données démographiques et autres sur les populations exposées.

Il faudrait suivre avec attention les affections suivantes : affections chroniques de la gorge, bronchites chroniques, asthme, emphysème, fibrose pulmonaire et maladies cardio-pulmonaires (coeur pulmonaire).

Il faudrait observer tout particulièrement les groupes de population faisant l'objet de soins particuliers, par exemple les malades cardiaques ou emphysemateux, et les groupes de population en bonne santé soumis à des soins préventifs spéciaux (enfants, femmes enceintes, sportifs, etc.). Il faudrait recommander à propos de ces groupes quelques études physiologiques simples dans le cadre des examens de routine. On pourrait ainsi comparer les résultats provenant de zones ayant des degrés de pollution différents.

Ce genre de travaux est surtout utile si l'on possède en même temps des données adéquates sur le milieu.

Etudes sur le comportement. On a effectué, notamment en URSS, de nombreux travaux sur les réflexes conditionnés et les effets physiologiques sensoriels des polluants. Il a été suggéré que ces méthodes d'évaluation des effets à long terme ont probablement une portée limitée. Les quelques tentatives que l'on a faites pour confirmer ces études, notamment en ce qui concerne les vapeurs de solvants, indiquent que de telles méthodes sont relativement peu sensibles. Il conviendrait d'étudier davantage la valeur de ces méthodes dans le cas d'expositions de brève ou de longue durée.

Etudes prospectives pour l'évaluation des effets à long terme de la pollution atmosphérique. Etant donné que la composition des polluants atmosphériques est complexe et peut varier selon l'endroit et que le climat peut avoir des effets importants, il est souhaitable d'effectuer les enquêtes épidémiologiques sur une plus large échelle et dans un plus grand nombre d'endroits que précédemment. Pour que les résultats obtenus soient comparables et riches en enseignements, il faut, premièrement, décrire de manière circonstanciée le type d'exposition, deuxièmement, effectuer, en se fondant sur un échantillon approprié de la population, des mesures valables des effets médicaux, et troisièmement, mettre au point une méthode satisfaisante pour poursuivre l'action entreprise.

L'enquête doit être écologique, c'est-à-dire fondée sur l'étude de l'exposition et de la morbidité dans un très grand nombre (des centaines) de districts. Il faut choisir ces districts de manière à assurer la plus grande variété possible d'intensité d'exposition et de climat. Les travaux statistiques

et les sondages de population peuvent fournir d'autres critères pour le choix des districts.

Lorsqu'il s'agira de choisir des districts pour les enquêtes, il faudra faire une étude préliminaire des variables pertinentes dans un nombre beaucoup plus élevé de districts, notamment pour ce qui est de la concentration des polluants les plus importants et des données existantes sur la structure de la population.

Le second problème qui se pose est celui de la mesure des effets de la pollution. Il n'est pas toujours possible d'effectuer des examens médicaux détaillés d'un échantillon de la population; par ailleurs, il ne serait pas non plus satisfaisant de se fonder uniquement sur les statistiques officielles existantes de morbidité et de mortalité. Il conviendrait par conséquent d'étudier la possibilité d'envoyer des questionnaires par la poste pour évaluer les informations pertinentes sur les symptômes respiratoires et cardio-vasculaires. Cette méthode a déjà été expérimentée dans certains pays et mérite d'être étudiée plus avant.

Pour qu'une étude de ce genre soit réaliste, il ne faut pas exiger que les renseignements fournis sur tous les symptômes soient nécessairement complets. On notera à ce propos les questionnaires utilisés par le British Medical Research Council sur les symptômes respiratoires et les symptômes de l'angine de poitrine, qui s'inspirent du questionnaire destiné aux enquêtes sur le terrain, mis au point et normalisé par l'OMS. Il faudrait effectuer les enquêtes sur le modèle des questionnaires mentionnés ci-dessus ou de méthodes similaires, en veillant dans toute la mesure du possible à ce que les données relatives à l'évaluation du degré d'exposition et des effets de la pollution soient comparables.

Il faut vérifier la validité d'une telle méthode. On doit pour cela procéder à des interrogatoires directs ou à un examen clinique simple du fonctionnement des poumons ($FEV_{1.0}$), et évaluer le taux d'exposition à la pollution du milieu pour un sous-échantillon limité de personnes et de zones. Il conviendrait d'entreprendre dès que possible ces études méthodologiques, sous forme d'études pilotes, et de former en même temps du personnel à l'utilisation des questionnaires et éventuellement à l'emploi de magnétophones. De telles opérations pilotes

permettent de vérifier la variabilité des observations chez un même observateur et d'un observateur à l'autre, et de procéder au choix des questions et des enquêteurs.

Les méthodes ci-dessus doivent permettre d'établir des estimations supplémentaires de la proportion de malades, mais pour évaluer le taux de morbidité deux types différents d'observations en série pourraient être faites. Le premier consisterait à répéter la même enquête (par courrier ou par interrogatoire direct) et le même test, en utilisant si possible exactement les mêmes méthodes et les mêmes enquêteurs ou examinateurs, et en outre à recueillir, en les tirant si possible des dossiers médicaux, des renseignements supplémentaires sur les cas de maladies respiratoires entraînant l'invalidité. Grâce à une telle méthode, on pourrait également évaluer la variabilité des observations de chaque enquêteur. Une seconde méthode consisterait à déterminer, par recoupement avec les registres officiels, le moment et la cause de l'invalidité, de la cessation d'activité ou du décès. Ces statistiques de décès ou de cessation d'activité sont fastidieuses lorsqu'il faut les établir à la main, mais l'emploi d'ordinateurs facilite grandement le travail.

Problèmes sur lesquels doit porter la recherche

Pollution du milieu en général

Les recherches relatives aux effets de la pollution du milieu sur la santé ont porté en priorité sur les effets combinés de la pollution de l'air et de l'eau et, le cas échéant, des aliments et du sol.

Il faudrait multiplier et approfondir les efforts en vue de déterminer, par des méthodes épidémiologiques et des études en laboratoire, les rapports existant entre les divers types et densités de polluants des différents milieux et les quantités de polluants et de métabolites de ces derniers présents dans les tissus et les humeurs du corps, ainsi que leurs effets sur la santé de l'homme ou des animaux.

Il faudrait rechercher des moyens permettant d'appliquer à l'homme de manière plus sûre les données d'expérience et les données relatives aux animaux concernant les effets des polluants.

Il convient d'étudier de manière approfondie, tant chez l'animal que chez l'homme, les moyens de défense du corps contre les polluants (surtout lorsque ceux-ci sont présents en faibles quantités) et les problèmes connexes de l'adaptation.

Il faudrait étudier plus avant le rôle que jouent l'absorption, la répartition, la rétention et l'excrétion dans la toxicité des polluants.

Il est souhaitable d'intensifier les recherches sur les substances susceptibles d'avoir des effets cancérigènes, mutagènes ou tératogènes.

Il faudrait consacrer davantage d'attention à l'étude des effets des polluants sur le vieillissement et le raccourcissement de la durée de vie.

Il convient d'encourager les industries, lors de la mise au point d'un nouveau produit, non seulement à considérer son utilité et sa sécurité d'emploi, mais également à rechercher s'il est susceptible de contaminer le milieu après usage, c'est-à-dire par exemple à étudier les risques de dégradation des détergents et les produits de combustion des matières plastiques.

Identification des polluants. Il convient d'identifier les polluants du milieu : en ce qui concerne l'atmosphère, d'établir une distinction entre les composés organiques du soufre et de l'azote, les hydrocarbures halogénés et les autres composés halogènes, les métaux et les métalloïdes susceptibles d'avoir des effets sur la santé; en ce qui concerne l'eau, de distinguer les divers pesticides ainsi que les métaux et métalloïdes et en ce qui concerne les aliments (et les boissons), de classer les polluants selon qu'il s'agit de pesticides ou de corps rangés parmi les métaux ou les métalloïdes.

Evaluation des quantités de polluants dans le corps. Il faudrait effectuer, dans de nombreuses régions géographiques, des études systématiques portant sur la teneur en métaux, pesticides et autres polluants organiques des tissus humains, y compris le sang et l'urine, en se préoccupant surtout du plomb, du cadmium et des pesticides. Il conviendrait chaque fois que cela serait possible d'évaluer simultanément le degré d'exposition à ces substances imputable à l'atmosphère, à l'eau, à la nourriture, au tabac et à l'activité professionnelle. Il faudrait également chercher à obtenir des renseignements analogues sur les animaux sauvages et domestiques.

Etude à long terme des groupes de population particulièrement exposés. Il importe d'effectuer des études de contrôle à long terme sur certains groupes de population bien définis, particulièrement exposés aux polluants qui peuvent affecter la communauté en général. Il peut s'agir de groupes ayant une même activité professionnelle ou résidant au même endroit : personnes exposées à des concentrations particulièrement fortes de plomb (comme dans le cas des agents de la circulation), populations résidant à proximité d'usines d'affinage des métaux, personnes résidant dans des quartiers où l'eau potable a une teneur en chrome extrêmement forte, personnes travaillant dans des entrepôts frigorifiques où l'on utilise l'ozone comme désodorisant, personnes exposées au mercure à l'intérieur ou dans le voisinage d'usines fabriquant du chlore par le procédé alcalin, personnes exposées à l'arsenic dans les communautés où l'on utilise du charbon à forte teneur en arsenic, personnes exposées à l'oxyde de carbone dans les villes à forte circulation automobile ou parmi les ouvriers d'aciéries, etc. Il s'agirait dans ces études de détecter tout écart par rapport aux conditions normales, en utilisant des méthodes physiologiques et biochimiques très sensibles, ainsi qu'en observant les différences dans les taux de morbidité et de mortalité.

Enquête sur les personnes particulièrement exposées aux insecticides. Il faudrait effectuer des études épidémiologiques, rétrospectives et surtout prospectives, sur les groupes exposés à des quantités inhabituelles de composés chlorés d'hydrocarbures, de phosphates organiques et d'autres pesticides. On trouve un tel groupe de population à proximité de Ferrare en Italie. L'utilité d'enquêtes analogues se trouve rehaussée lorsqu'elles s'accompagnent d'études sur les effets des pesticides sur la faune de la région. Il faudrait étudier entre autres les effets éventuels, chroniques et indirects, de l'absorption de pesticides. De telles études seraient particulièrement appropriées dans les régions où l'on utilise de grandes quantités de pesticides dans le cadre des programmes d'éradication du paludisme.

Mise au point de méthodes d'enquête par questionnaires envoyés par la poste. Il conviendrait d'étudier la possibilité d'effectuer une enquête sur les symptômes respiratoires et cardiaques (et éventuellement sur les affections des yeux et de

la peau) en envoyant un questionnaire normalisé à un grand nombre de groupes de populations de différents pays. Les zones retenues devraient être très différentes sur le plan de la pollution et celui du climat. Il sera également nécessaire de normaliser les mesures de la pollution et de mettre au point un système permettant d'interroger directement un certain échantillon de la population pour vérifier la validité des réponses fournies au questionnaire et confirmer les antécédents des intéressés en matière d'exposition.

Rapports pouvant exister entre les affections cardio-pulmonaires (coeur pulmonaire) et l'exposition aux polluants. Davantage de comparaisons devraient être établies sur le plan international dans certains hôpitaux en ce qui concerne la proportion de malades atteints de coeur pulmonaire et la fréquence des cas d'affections cardio-pulmonaires notés au moment de l'autopsie. Il sera nécessaire à cet effet de normaliser les critères appliqués pour la formulation des diagnostics sur sujets vivants et au moment de l'autopsie.

Etude intensive des allergies respiratoires épidémiques. Il conviendrait d'étudier les cas de pollution atmosphérique locale épisodiques susceptibles d'être liés à des allergies respiratoires épidémiques.

Uniformisation des données sur l'exposition résultant de l'exercice de la profession. Pour pouvoir trouver une solution aux effets à long terme de la pollution (et d'autres facteurs mésologiques) sur la santé, il est nécessaire de disposer de renseignements couvrant toute la vie de l'individu et le milieu dans lequel il vit. Il faudrait encourager les pays à uniformiser leurs dossiers médicaux et à en permettre l'accès aux chercheurs médicaux, afin de mettre en commun les renseignements sur la profession, le lieu de résidence, les maladies et les décès des individus et des groupes de population.

Normalisation des observations

Normalisation des méthodes de laboratoire. Il conviendrait, lors de la mise au point et de la normalisation des méthodes de recherche en laboratoire, de se pencher sur au moins cinq problèmes : i) faire un usage plus poussé des nouvelles méthodes analytiques dans le cas des polluants; ii) construire des

modèles mathématiques pour évaluer les doses intégrées de polluants; iii) comparer les méthodes permettant de mesurer les réactions physiologiques et biochimiques aux polluants; iv) mettre au point de nouvelles méthodes de mesure des réactions; v) élaborer des méthodes d'examen rapides permettant d'identifier les risques liés aux nouveaux polluants chimiques.

Normalisation des méthodes épidémiologiques. Il faudrait charger des centres de référence de mettre au point, d'expérimenter et de normaliser des méthodes épidémiologiques pour l'étude des effets à long terme des polluants. Il conviendrait tout d'abord de se pencher sur les questionnaires employés dans les interrogatoires directs ou envoyés par la poste pour étudier les réactions respiratoires aux polluants. Les centres devraient également former du personnel à l'emploi de méthodes normalisées, mettre au point des méthodes normalisées pour mesurer l'exposition chez les divers groupes de population étudiés, et rendre les diverses études comparables en maintenant le contact avec les équipes sur le terrain.

Expériences sur les animaux

Expositions expérimentales à des mélanges polluants dans des conditions réalistes. Dans ces expériences, les animaux devraient être exposés à des mélanges et des quantités de polluants atmosphériques qui correspondent à la réalité et recevoir de l'eau et une nourriture ayant une teneur en polluants divers qui soit réaliste. Il faudrait, entre autres observations, étudier la toxicité, les effets sur le comportement social et les effets sur le vieillissement et sur la longévité.

Expériences à grande échelle. Afin de pouvoir plus sûrement extrapoler les cas à faible fréquence pour prédire les risques que peuvent présenter les polluants pour la santé de l'homme, il est recommandé d'utiliser pour certaines expériences un grand nombre (des milliers) d'animaux.

Action combinée des polluants et des infections. Certaines expériences devraient porter sur les effets des polluants joints à une exposition à des agents infectieux (naturels ou inoculés artificiellement). Il faudrait également faire des expériences sur des animaux ayant certains organes malades ou souffrant d'une asthénie généralisée.

Etudes épidémiologiques sur les animaux. Les études épidémiologiques des effets des polluants doivent porter notamment sur les milieux récepteurs naturels, ainsi que sur les animaux sauvages et domestiques; pour ces derniers, une coopération en matière de recherche vétérinaire s'impose. Il convient d'intensifier les travaux visant à créer de nouvelles races consanguines et de nouvelles espèces d'animaux pour les recherches en laboratoires sur les effets des polluants.

Etudes sur les enzymes

Rôle des enzymes dans l'adaptation aux polluants. De nouvelles mesures devraient être prises pour identifier les polluants qui stimulent la production d'enzymes permettant une telle adaptation chez l'animal et chez l'homme, en portant une attention particulière aux stimulations répétées, afin d'essayer de comprendre le mécanisme de défense du corps contre les polluants. Il convient de déterminer les différences de réactions entre les diverses espèces et races; il faut par ailleurs évaluer l'influence de l'âge sur les effets des polluants, et étudier le mécanisme des modifications qui se produisent.

Réactions d'immunité à l'égard des polluants. Il convient de poursuivre les travaux de recherche sur les réactions d'immunité à l'égard des polluants, d'identifier les polluants qui ont de tels effets et de déterminer les effets de combinaisons de polluants sur le processus d'immunisation. Il faut poursuivre et intensifier les recherches sur les effets d'immunisation des infections, volontaires ou naturelles, se superposant à une exposition à des polluants.

Autres mécanismes d'adaptation. Il faut étudier la manière dont le système nerveux central contribue à maintenir l'équilibre homéostatique et ainsi à défendre l'organisme et à l'adapter aux polluants. Il convient par ailleurs de s'efforcer de trouver le moyen d'améliorer les défenses naturelles de l'organisme contre les polluants et ses mécanismes d'adaptation.

Métabolisme des polluants absorbés

Il est nécessaire de développer les recherches sur l'absorption, la répartition, le métabolisme, la rétention et l'excrétion des polluants du milieu; ces recherches doivent porter notamment sur les moyens de pénétration : peau, système respiratoire et système gastro-intestinal. Ces études doivent porter surtout sur des groupes ou types de substances composées telles que les carbamates ou d'autres pesticides récents, les époxydes, les composés aminés et nitrés aromatiques les plus importants, les nitrosamines d'alkyle et d'autres substances qui peuvent avoir des effets cancérigènes, mutagènes ou tératogènes, certaines substances halogénées, les mélanges d'aérosols et certains métaux et métalloïdes.

Etudes des effets cancérigènes et mutagènes

Les recherches sur les effets cancérigènes et mutagènes des polluants doivent porter sur cinq aspects : i) les moyens de pénétration; ii) le métabolisme; iii) les différences entre espèces; iv) les agents promoteurs ou accélérateurs; v) les rapports entre les doses reçues et les réactions. Les recherches sur les effets tératogènes doivent avoir pour objet, en premier lieu, de déterminer les doses les plus faibles des divers polluants de l'eau ou de l'atmosphère susceptibles d'avoir de tels effets.

Effets à long terme des polluants sur le vieillissement

Les recherches sur le vieillissement ou le raccourcissement de la durée de vie doivent avoir pour objet :

- a) D'étudier les divers polluants pour déterminer s'ils sont susceptibles d'avoir de tels effets et établir les rapports entre l'importance des doses reçues et les réactions;
- b) De déterminer le processus de ces effets;
- c) D'établir des critères pour définir le processus de vieillissement.

On trouvera une liste des problèmes de recherche énumérés dans le présent chapitre, ainsi que des autres enquêtes proposées par les groupes scientifiques et des recommandations qu'ils ont adressées à l'OMS, dans "Les problèmes de recherche sur la pollution du milieu".

APPENDICE I

Composition des groupes scientifiques sur les différents aspects
de la pollution du milieu qui se sont réunis à Genève de
mars 1963 à novembre 1965

Polluants microchimiques du milieu (mars 1963)

Membres :

Dr Barnes, Directeur du service de recherches toxicologiques des laboratoires
du Medical Research Council, à Carshalton, Surrey (Royaume-Uni)

Professeur Bonnevie, Directeur de l'Institut supérieur d'hygiène de
Copenhague (Danemark)

Professeur Fair, Professeur de technique sanitaire à l'Université Harvard,
Cambridge, Mass., (Etats-Unis d'Amérique)

Dr Lawther, Directeur du service de recherches sur la pollution de l'air
du Medical Research Council, Londres (Royaume-Uni)

Secrétariat :

Dr Hollis, Directeur de la division d'hygiène du milieu

Dr Laird, Chef du service de biologie du milieu

M. Pavanello, Chef du service de la pollution de l'air et de l'eau

Groupe scientifique de l'estimation biologique des degrés de pollution de l'eau
(1er au 5 juin 1964)

Membres :

Dr Bick, Zoologischen Sammlung, Faculté d'agronomie de l'Université de Bonn, Allemagne

Dr Bonde, Institut supérieur d'hygiène de Copenhague (Danemark)

Dr Cholnoky, Institut national de recherche hydrologique de Grahamstown, (Afrique du Sud)

Professeur Huet, Directeur de la Station de recherches des eaux et forêts de Groenendaal-Hoeilaart, Bruxelles, (Belgique)

Dr Hynes, maître de conférences en zoologie (eau douce) à l'Université de Liverpool, (Royaume-Uni) 1/ (Président)

Dr Jekov, Chef du laboratoire de microbiologie sanitaire de Sofia, (Bulgarie)

Professeur Liebmann, Institut bavarois de recherches biologiques (Institut Demoll-Hofer), Munich, (Allemagne)

Professeur Rodina, Institut de zoologie de l'Académie des sciences de Léningrad, (URSS) (Vice-Président)

Professeur Stangenberg, Directeur de l'Institut de limnologie et d'ichtyologie de Wroclaw, (Pologne)

Dr Tarzwell, Chef du service de biologie aquatique du Centre de génie sanitaire du Service de la santé publique des Etats-Unis à Cincinnati, Ohio, (Etats-Unis d'Amérique) (Rapporteur)

Secrétariat :

Dr Laird, Chef du service de biologie du milieu de la Division de l'hygiène du milieu (Secrétaire)

1/ Poste actuel : Professeur de biologie à l'Université de Waterloo, Ontario, (Canada).

Groupe scientifique sur les aspects biologiques de la pollution microchimique des systèmes hydriques (8 au 12 juin 1964)

Membres :

M. Beak, Directeur de la T. W. Beak Consultants Ltd., à Collins Bay, Ontario, (Canada) (Président)

Dr Jekov, Chef du département de salubrité des eaux de l'Institut de recherche scientifique en matière d'hygiène et d'assainissement de Sofia, (Bulgarie) (Vice-Président)

Professeur Hettche, Directeur du Landesanstalt für Immissions-und Bodennutzungsschutz d'Essen, (Allemagne)

Dr Kaminski, Institut militaire d'hygiène et d'épidémiologie de Varsovie, (Pologne)

M. Khan, Centre régional de l'Institut central de recherche appliquée en matière de santé publique, c/o Faculté de médecine Osmania, Hyderabad, (Inde)

Dr Ormay, Chef du laboratoire de microbiologie du milieu de l'Institut d'état en matière d'hygiène de Budapest, (Hongrie)

Professeur Rodina, Institut de zoologie de l'Académie des sciences de Léningrad, (URSS)

Dr Southgate, Directeur du laboratoire de recherche sur la pollution des eaux de Stevenage, Herts, (Royaume-Uni) (Rapporteur)

Dr Tarzwell, Chef du service de biologie aquatique du Robert A. Taft Sanitary Engineering Center, Cincinnati, Ohio, (Etats-Unis d'Amérique)

Professeur Tonolli, Directeur de l'Institut italien d'hydrobiologie de Pallanza, Novara, (Italie)

M. Warner, Chef de la section de biologie de l'Engineering Science Inc., Oakland, Californie, (Etats-Unis d'Amérique)

Secrétariat :

Dr Laird, Chef du service de biologie du milieu de la Division de l'hygiène du milieu

Groupe scientifique sur les recherches en matière de pollution du milieu
(20 au 25 juillet 1964)

Membres :

Professeur Giovanardi, Directeur de l'Institut supérieur d'hygiène de Milan,
(Italie)

Dr Goldsmith, Chef du service d'études médicales sur la pollution
atmosphérique du Service de la santé publique de Californie, Berkeley,
Californie, (Etats-Unis d'Amérique)

Dr Jammet, Chef du Département de la protection sanitaire du Centre d'études
nucléaires de Fontenay-aux-Roses, (France)

M. Kramer, Directeur du Robert A. Taft Sanitary Engineering Center,
Cincinnati, Ohio, (Etats-Unis d'Amérique) (Président)

Dr Lawther, Directeur du service de recherches sur la pollution de l'air du
Medical Research Council, St Bartholomew's Hospital, Londres, (Royaume-Uni)

Professeur Leclerc, Directeur du Centre belge d'étude et de documentation
des eaux à Liège, (Belgique) (Rapporteur)

Dr Martin, Fonctionnaire supérieur des services médicaux du Ministère de
la santé, Londres, (Royaume-Uni)

Professeur Rjazanov, Directeur de l'Institut d'hygiène générale et
municipale de Moscou, (URSS) (Vice-Président)

Dr Stander, Directeur de l'Institut national de recherche hydrologique de
Pretoria, (Afrique du Sud)

Professeur Vouk, Directeur de l'Institut de recherche médical de Zagreb,
(Yougoslavie) (Rapporteur)

Secrétariat :

M. Pavanello, Chef du service de la pollution de l'air et de l'eau de la
Division de l'hygiène du milieu (Secrétaire)

Professeur McKee, W. M. Keck Laboratory of Environmental Health Engineering,
California Institute of Technology, Pasadena, Californie, (Etats-Unis
d'Amérique) (Conseiller temporaire)

Groupe scientifique sur les effets à long terme des nouveaux polluants sur la santé (10 au 16 novembre 1964)

Membres :

Professeur Bonnevie, Directeur de l'Institut supérieur d'hygiène de Copenhague, (Danemark)

Professeur Friberg, Directeur du département d'hygiène du Karolinska Institutet de Stockholm, (Suède)

Dr Gilson, Directeur du MRC, Service de recherche sur la pneumoconiose du Medical Research Council, Llandough Hospital, Penarth, Glamorgan, (Royaume-Uni) (Président)

Dr Lafontaine, Directeur de l'Institut d'hygiène et d'épidémiologie (Ministère de la santé publique et de la famille), Bruxelles-Ixelles, (Belgique)

Dr Nelson, Directeur de l'Institut de médecine du milieu du Centre médical universitaire de New York, (Etats-Unis d'Amérique)

Professeur Paccagnella, Directeur de l'Institut d'hygiène de l'Université de Ferrare, (Italie)

Dr Pachner, Institut d'hygiène industrielle et des maladies professionnelles, Prague, (Tchécoslovaquie) (Vice-Président)

Dr Stokinger, Chef de la section de toxicologie du service de la formation et de la recherche en matière de médecine du travail de la Division de médecine du travail du service de la santé publique des Etats-Unis à Cincinnati, Ohio, (Etats-Unis d'Amérique) (Rapporteur)

Dr Zapp, Directeur du Laboratoire Haskell de toxicologie et de médecine industrielle de la Société Dupont de Nemours à Wilmington, Delaware, (Etats-Unis d'Amérique)

Secrétariat :

M. Pavanello, Chef du service de pollution du milieu de la Division de l'hygiène du milieu (Secrétaire)

Dr Goldsmith, Epidémiologiste, au service de la pollution du milieu de la Division de l'hygiène du milieu

Groupe scientifique pour l'identification et la mesure des polluants atmosphériques
(16 au 22 novembre 1965)

Membres :

Professeur Chovin, Directeur du Laboratoire municipal de la Préfecture de police de Paris, (France)

Professeur Katz, Smith College of Engineering, Université de Syracuse, NY, (Etats-Unis d'Amérique)

Professeur Kitagawa, Département de la sécurité dans le domaine du génie chimique, Université nationale de Yokohama, Ohkamachi, Minamiku, Yokohama, (Japon)

Dr Lawther, Directeur du Service de recherche sur la pollution atmosphérique de la Faculté de médecine de St Bartholomew's Hospital à Londres, (Royaume-Uni) (Président)

Dr Ludwig, Chef du laboratoire de sciences physiques et appliquées du Robert A. Taft Sanitary Engineering Center de Cincinnati, Ohio, (Etats-Unis d'Amérique) (Rapporteur)

Professeur Symon, Directeur de l'Institut d'hygiène, Srobarova 48, Prague, (Tchécoslovaquie)

Professeur Petrilli, Directeur de l'Institut supérieur d'hygiène de Gênes, (Italie)

Professeur Rjazanov, Directeur de l'Institut d'hygiène générale et municipale de Moscou, (URSS) (Vice-Président)

Professeur Silverman, Chef du Département d'hygiène industrielle de l'Institut Harvard de santé publique, Boston, Mass., (Etats-Unis d'Amérique)

Représentant de l'organisation météorologique mondiale

Professeur Schmidt, Président du Groupe de travail de l'OMM sur la pollution atmosphérique et la chimie atmosphérique, Institut météorologique royal des Pays-Bas, Utrechtse weg 297, De Bilt, (Pays-Bas)

Représentants de l'Union internationale de chimie pure et appliquée

Dr Morf, Secrétaire général de l'Union internationale de chimie pure et appliquée, c/o Hoffmann-La-Roche et Cie, Bâle, (Suisse)

Professeur Truhaut, Directeur de la Division de chimie appliquée de l'Union internationale de chimie pure et appliquée, Faculté de pharmacie de l'Université de Paris, (France)

Observateur de l'Organisation de coopération et de développement économiques

M. Lieben, Direction des affaires scientifiques de l'OCDE, Paris, (France)

Secrétariat :

M. Pavanello, Chef du Service de la pollution du milieu de la Division de l'hygiène du milieu (Secrétaire)

Dr Goldsmith, Epidémiologiste au service de la pollution du milieu de la Division de l'hygiène du milieu

Professeur Philip Best, Faculté de physique et chimie de l'Université de l'Etat de Louisiane, Baton Rouge, Louisiane, (Etats-Unis d'Amérique)
(Conseiller temporaire)

Blank page

Page blanche

Blank page

Page blanche

APPENDICE II

Bibliographie sommaire

- FAO/OMS: Evaluation de la toxicité des résidus de pesticides dans les aliments (rapport d'une réunion mixte du Comité de la FAO sur l'emploi des pesticides en agriculture et du Comité d'experts de l'OMS sur les résidus des pesticides). 1963
- Rapport d'une deuxième réunion mixte des deux comités susmentionnés et monographie sur les pesticides. 1965

Publications de l'OMS

Bulletin de l'OMS

- Vol. 14, Nos 5 et 6 - Hygiène de l'eau (1956)
- Vol. 16, No 3 - Onchocercose et filariose (1957)
- Vol. 25, Nos 4 et 5 - Bilharziose (1961)
- Vol. 27, Nos 4 et 5 - Onchocercose et filariose (1962)

Série de monographies de l'OMS :

- No 16 Toxicité pour l'homme de certains pesticides (1953)
- No 18 Plans et fonctionnement des fosses septiques (1953)
- No 31 Compostage et assainissement (1956)
- No 32 L'enseignement du génie sanitaire (1956)
- No 39 Evacuation des excréta dans les zones rurales et les petites agglomérations (1958)
- No 46 La pollution de l'air (1961)

Cahiers de santé publique :

- No 10 La lutte contre les helminthes transmis par le sol (1961)
- No 13 Quelques aspects de la protection des eaux contre la pollution (1962)
- No 15 L'épidémiologie de la pollution de l'air (1962)
- No 23 L'approvisionnement des villes en eau : situation et besoins dans soixante-quinze pays en voie de développement (1963)

Série de rapports techniques :

- No 10 Comité d'experts de l'assainissement : Rapport sur la première session (1950)
- No 47 Comité d'experts de l'assainissement : deuxième rapport (1951)
- No 77 Comité d'experts de l'assainissement : troisième rapport (1953)
- No 144 Méthode d'essai toxicologique des additifs alimentaires : deuxième rapport du Comité d'experts commun FAO/OMS sur les additifs alimentaires (1958)
- No 157 Cinquième rapport du Comité d'experts de l'assainissement : la pollution de l'air (1958)
- No 213 Coeur pulmonaire chronique : Rapport d'un comité d'experts (1961)
- No 233 Comité d'experts de la filariose (1962)
- No 246 Problèmes de médecine du travail dans l'agriculture : quatrième rapport du Comité commun OIT/OMS sur la médecine du travail (1962)
- No 248 Gravité relative des dangers créés par les rayonnements : troisième rapport du Comité d'experts sur les rayonnements (1962)
- No 271 Les polluants atmosphériques : Rapport d'un comité d'experts de l'OMS (1963)
- No 285 Comité d'experts de l'hépatite (1964)
- No 292 Les modifications du milieu et leurs effets sur la santé : Rapport d'un comité d'experts de l'OMS (1964)
- No 297 L'urbanisme et l'aménagement urbain dans leurs rapports avec l'hygiène du milieu : Rapport d'un comité d'experts de l'OMS (1965)
- No 318 Lutte contre la pollution des eaux : Rapport d'un comité d'experts de l'OMS (1966)
- La pollution des eaux en Europe, OMS, Bureau régional de l'Europe (1956)
- Normes européennes applicables à l'eau de boisson (1961)
- Normes internationales applicables à l'eau de boisson (édition révisée) (1963)
- Spécifications applicables aux insecticides (deuxième édition) (1961)
- La pollution de l'air : Enquête sur les législations en vigueur (1963)
- Critères et méthodes de mesure de la pureté de l'air : Rapport d'un colloque interrégional (1963)
- Guide des méthodes de mesure des polluants atmosphériques (en préparation)

ANNEXE II

CENTRES INTERNATIONAUX DE REFERENCE DE L'OMS

TABLE DES MATIERES

	<u>Pages</u>
1. INTRODUCTION	122
2. DEFINITIONS	122
3. DENOMINATION	124
4. OBJET ET FONCTIONS	125
a) Objet	125
i) Etablissement d'étalons	125
ii) Consultations	127
iii) Réunion, production et distribution de matériel ..	127
iv) Echange de renseignements techniques	127
v) Formation	128
b) Fonctions	128
5. PRESENTATION DE RAPPORTS PAR LES CIR ET CRR DE L'OMS	129
6. CRITERES DEVANT REGIR LE CHOIX DES CIR	129
a) Objet	129
b) Emplacement	129
c) Institution	129
7. DESIGNATION	130
8. RESPONSABILITES DE L'OMS A L'EGARD DES CIR ET CRR	131
9. RESPONSABILITES DES INSTITUTIONS HOTES A L'EGARD DES CIR DE L'OMS	131

1. INTRODUCTION

Ce document traite des Centres internationaux de référence (CIR) et des Centres régionaux de référence (CRR) de l'OMS, de leurs relations réciproques et de leurs rapports avec les Centres nationaux de référence (CNR). Ces trois catégories de centres forment un réseau mondial d'institutions dont le but est de promouvoir l'utilisation d'étalons et de normes applicables à certaines substances, d'encourager les recherches et de développer la collaboration à propos des problèmes qui se présentent au cours du travail de référence des centres.

Les centres de référence qui ressortissent aux activités et aux responsabilités internationales de l'OMS sont de catégories trop diverses pour qu'il puisse en être donné ici une description complète, même rapide. Nous nous proposons néanmoins d'en brosser un tableau général que les personnes intéressées pourront consulter avec profit.

2. DEFINITIONS

a) Un Centre international de référence (CIR) est une institution désignée, soit par l'OMS, soit par des organismes internationaux compétents et spécialisés, pour aider à porter et à maintenir les normes de travail au niveau requis dans des domaines spécialisés^{1/}. Un Centre international de référence (CIR) exécute certains travaux qui présentent un intérêt international pour l'action et la recherche médico-sanitaires^{2/}. Ces travaux visent à augmenter la précision, la sûreté, la concordance et la comparabilité des méthodes, ainsi qu'à améliorer les résultats des études nationales et internationales.

b) Un Centre régional de référence (CRR) assume des responsabilités semblables à celles d'un CIR mais limitées à son domaine d'action propre et circonscrites à un groupe de pays géographiquement apparentés^{3/}. Il collabore avec le CIR dans son domaine d'activités en rassemblant des données et du matériel, en participant à l'établissement de classifications, etc., et il maintient des relations

1/ Il existe des CIR mixtes OMS/FAO pour des questions intéressant les deux organisations, par exemple brucellose, leptospirose.

2/ Lorsqu'il s'agit des CIR, il n'y a pas lieu d'établir de distinction entre l'action et la recherche.

3/ Le terme "régional" désigne ici un groupement géographique qui ne coïncide pas nécessairement avec une région de l'OMS.

particulièrement étroites d'ordre consultatif, avec les centres nationaux de référence. Il répond aux demandes de renseignements qui lui sont envoyées par ces derniers et ne saisit le CIR que des problèmes qu'il ne peut lui-même résoudre. Les CRR sont établis par l'OMS en accord avec le CIR. En règle générale, il y a un seul CRR par région; s'il n'en existe pas, les centres nationaux de référence travaillent en liaison directe avec les CIR.

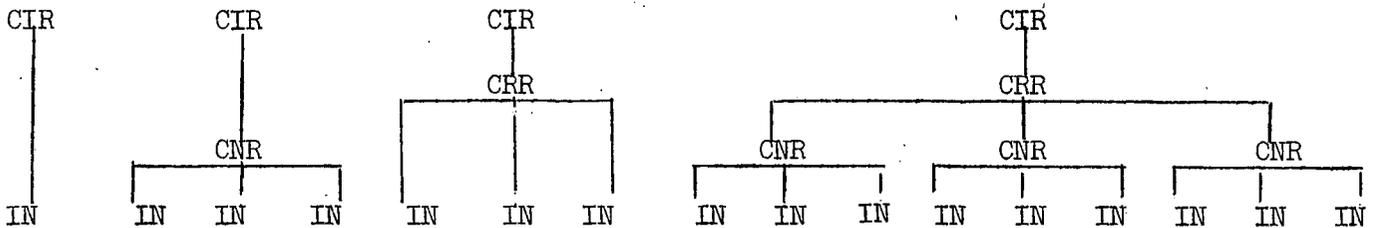
c) Un Centre national de référence (CNR) est institué par un gouvernement pour donner des avis consultatifs dans un domaine donné et il ne relève que de son gouvernement. Un CNR peut se mettre directement en rapport avec le CRR de sa région et, s'il n'en existe pas, avec le CIR. Il est habilité à recevoir, sur la demande du CRR ou du CIR, des échantillons d'étalons de substances, accompagnés des renseignements nécessaires sur leur mode d'utilisation, et il peut transmettre ce matériel à d'autres institutions nationales (IN) ou établissements industriels du pays. En l'absence de CRR ou de IN, un service scientifique, un établissement industriel, ou un chercheur individuel peuvent entrer directement en rapport avec un CIR qui leur enverra, sur demande et dans la mesure des disponibilités, des étalons ou des préparations de référence.

d) Les laboratoires associés de l'OMS appartiennent à plusieurs catégories :

- i) Un laboratoire peut être désigné par un CIR, d'accord avec l'OMS, pour collaborer exclusivement avec lui pendant une année ou deux à un travail exigeant la coopération internationale.
- ii) Un laboratoire peut être désigné par l'OMS, d'accord avec un CIR, pour collaborer quelques mois avec ce dernier à l'examen de projets de classification ou de nomenclature internationale, avant que le CIR les soumette à l'Organisation.
- iii) Un laboratoire peut être désigné par l'OMS pour collaborer directement avec l'Organisation, pendant une période donnée, à réunir des renseignements ou du matériel, ou à exécuter certains travaux de référence de portée plus limitée que ceux habituellement confiés à un centre de référence désigné.

Le tableau suivant donne un aperçu des relations entre les divers centres de référence (CR) :

CENTRES INTERNATIONAUX DE REFERENCE



3. DENOMINATION

Ces centres sont généralement appelés "centres internationaux de référence", mais le mot "laboratoire" peut être substitué au mot "centre".

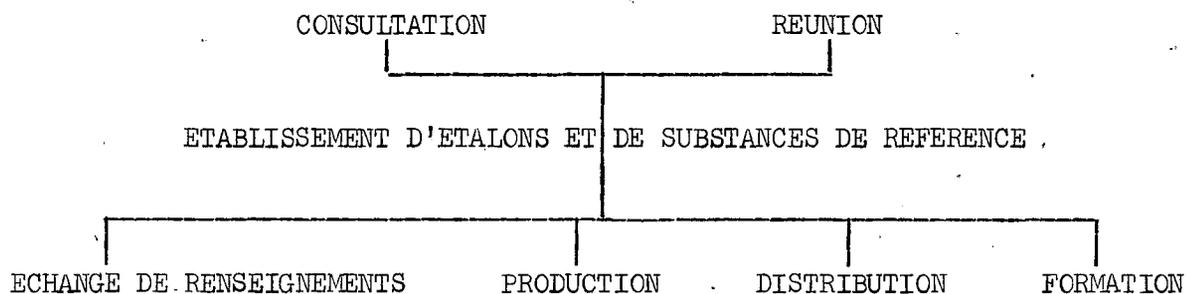
Si un centre international de référence a été désigné par l'OMS, on insérera dans sa dénomination les mots "Organisation mondiale de la santé" ou les initiales "OMS". Le mot "référence" est pris dans l'acception "soumission d'une question à une autorité aux fins de discussion ou d'information"; il implique une "consultation". Encore que, dans certains cas, le terme "laboratoire" soit plus spécifique que celui de "centre", il a généralement une acception restrictive et c'est pourquoi on lui préfère le mot "centre". La dénomination courante sera donc "Centre international ou 'régional' OMS de référence pour...".

Il peut y avoir des inconvénients à modifier le nom de laboratoires de référence établis de longue date; mais les centres de référence nouvellement créés seront, autant que possible, désignés par les initiales "CIR" ou "CRR".

4. OBJET ET FONCTIONS

a) Objet

Les CIR ont pour objet d'engager ou de développer certaines activités dans le domaine de l'action et de la recherche médico-sanitaires. Le schéma suivant indique l'ordre dans lequel les activités de ces centres se déroulent habituellement.



i) Etablissement d'étalons (à la demande de l'OMS)

Désignation de substances qui serviront d'étalons ou de préparations internationales de référence (et définition d'unités internationales). Etablissement de nomenclatures et de classifications-type, de normes minimums applicables à des substances biologiques, de listes de concentrations normales ou admissibles de substances toxiques dans l'organisme ou de niveaux admissibles de rayonnements potentiellement nocifs, de techniques et de méthodes normalisées, etc.^{1/}, afin d'en recommander l'utilisation sur le plan international.

^{1/} L'OMS s'occupe d'établir des étalons internationaux qui serviront à déterminer l'activité des substances biologiques et des normes internationales relatives à la qualité de ces substances; elle formule aussi des prescriptions recommandées pour certaines substances pharmaceutiques, et autres, pour divers produits, etc. En ce qui concerne la qualité des produits commerciaux, sa responsabilité se limite toutefois à recommander que lesdits produits soient soumis à un contrôle et reconnus conformes aux normes et prescriptions recommandées. Après vérification, les lots de produits peuvent être déclarés conformes ou non conformes, mais une déclaration de conformité ne saurait constituer une "approbation de l'OMS" vis-à-vis de tel produit.

Un étalon est un prototype agréé (modèle fourni pour imitation) servant d'unité de comparaison, comme l'ancien mètre étalon. Un étalon biologique permet de définir une propriété biologique, par exemple l'activité, en l'exprimant en certaines unités, par exemple les unités d'insuline. En anglais, le terme "standard", qui signifie "étalon", a également le sens d'"uniforme", par exemple lorsqu'on parle d'une "méthode standard".

/...

Le CIR joue dans ces travaux, notamment ceux de nomenclature et de classification, le rôle d'un centre de coordination agissant au nom de l'OMS, devant laquelle il est responsable. Il ne doit faire, ni publier, au sujet desdits travaux, aucune déclaration, sans l'assentiment de l'OMS.

Dans la pathologie du cancer, par exemple, un projet de classification, d'étalon, etc., est préparé avec le concours d'un groupe consultatif d'experts appartenant à des pays différents et représentant des écoles de pensée différentes. Il est étudié par le CIR, aidé de plusieurs laboratoires associés. Les propositions résultant de cette étude peuvent encore être transmises à d'autres laboratoires associés qui les examinent pendant quelques mois. Enfin, le CIR saisit l'OMS du projet pour que celle-ci en recommande l'adoption sur le plan international après l'avoir soumis, le cas échéant, à l'examen d'un groupe consultatif. Des organismes internationaux apparentés et compétents peuvent être consultés, soit au début de la procédure qui vient d'être décrite, soit au moment où les normes vont être publiées. L'établissement de nomenclatures ou de classifications internationales, de substances de référence, etc., constitue ordinairement une activité de durée limitée. Lorsque le travail est terminé - après une année ou davantage - le CIR peut, avec l'assentiment de son directeur, devenir un centre consultatif international. Le travail des laboratoires associés peut être considéré comme terminé à ce moment, mais il y aura avantage, dans certains cas, à avoir recours à ces laboratoires, après consultation avec l'OMS, pour la formation de chercheurs.

L'uniformisation des nomenclatures et des classifications a pour principal intérêt d'augmenter la comparabilité des études faites sur des groupes de populations de pays différents. On considère habituellement qu'une nomenclature ou une classification sont satisfaisantes si elles couvrent 90 à 95 p. 100 des situations dans lesquelles elles seront utilisées.

Avant de soumettre les nomenclatures et classifications à l'approbation finale de l'OMS, on les examinera de très près afin de voir dans quelle mesure on peut réduire la variabilité entre les observations faites par des spécialistes différents ou par le même spécialiste à des

moments différents; de cette façon, on pourra décider s'il convient d'en généraliser l'application. Il vaut mieux avoir un nombre limité de termes relativement peu spécifiques mais fournissant des données comparables, soit pour différents observateurs, soit pour le même observateur, qu'un grand nombre de termes hautement spécifiques mais moins comparables.

- ii) Consultations (à la demande des CRR ou, s'il n'en existe pas, des CNR ou de l'OMS)
 - 1) Identification des souches, organismes, parasites, vecteurs, tumeurs, etc.;
 - 2) Vérification de la précision et de la régularité des techniques, etc.;
 - 3) Contrôle d'autres étalons reconnus qui intéressent le CIR.

- iii) Réunion, production et distribution du matériel (avec l'accord de l'OMS et sur la demande des CRR ou des CNR)
 - 1) Souches de référence ou standardisées d'organismes, d'insectes, ou d'animaux, normaux ou anormaux, à des fins spécifiques;
 - 2) Substances de référence ou étalons de sérums, réactifs, préparations histopathologiques, tumeurs congelées, nécessaires d'épreuve, etc.

Ce travail commence lorsque les étalons ou les substances de référence ont été acceptés sur le plan international; il peut se prolonger indéfiniment. Toutefois, les CRR et les CNR, de par leur propre travail et la sélection qu'ils exercent parmi les demandes de services, contribuent à empêcher que le CIR ne soit surchargé. Les dépenses afférentes à ces activités, par exemple à la distribution du matériel, sont à la charge de l'OMS qui en paie le montant au CIR.

- iv) Echange de renseignements techniques (travaux courants)

Les centres rendent compte périodiquement à l'OMS des activités proposées dans la lettre de désignation et dans l'accord de services techniques;

ils lui fournissent également des renseignements techniques sur les souches d'organismes identifiées et leur origine^{1/} ainsi que sur le matériel collecté et distribué. L'OMS diffuse ensuite ces renseignements auprès des CRR, CNR, et autres établissements ou chercheurs intéressés. Parfois, il s'avère nécessaire de préparer des manuels.

v) Formation (à la demande de l'OMS ou des gouvernements)

De plus en plus on cherche à placer des boursiers de l'OMS, des bénéficiaires d'une subvention pour la formation de chercheurs ou d'autres stagiaires dans des centres internationaux. Un CIR peut commencer à former des chercheurs aussitôt après sa désignation; il est toutefois préférable qu'il attende d'avoir établi une classification, une technique, etc. Les CRR ou les laboratoires associés peuvent également former du personnel si leurs installations sont suffisantes. Les stagiaires désignés pour travailler dans un centre doivent être agréés par celui-ci avant que l'OMS ne puisse leur accorder une bourse ou une subvention pour formation à la recherche.

b) Fonctions

Les fonctions du CIR et les activités de l'institution hôte ne doivent pas être confondues. Les travaux du CIR doivent à tout moment se rapporter directement au domaine qu'il a été désigné pour étudier. En règle générale, l'institution hôte effectue des recherches, possède des installations cliniques et une bibliothèque; parfois aussi, elle se voit confier par le service de santé national des responsabilités d'ordre épidémiologique ou autre. Ces tâches ne coïncident pas nécessairement avec celles que le CIR ou le CRR exercent sur le plan international ou sur le plan régional. Cependant, il y a des domaines scientifiques où le directeur du CIR ou du CRR s'étant vivement intéressé à du matériel reçu par l'institution, certaines méthodes de recherche se sont élargies en même temps que s'instauraient une collaboration et une coordination plus étroites entre les CIR et les CRR.

^{1/} Il arrive souvent que les souches envoyées au CIR soient atypiques et non représentatives.

5. PRESENTATION DE RAPPORTS PAR LES CIR ET CRR DE L'OMS

Les CIR et CRR devront présenter à l'OMS des rapports périodiques ou des rapports techniques annuels sur leurs travaux. Ces rapports pourront être communiqués par l'OMS à d'autres institutions intéressées (voir alinéa iv) du par. 4). C'est généralement aux services de santé nationaux qu'il incombe de signaler la présence et la propagation d'une maladie dans un pays.

6. CRITERES DEVANT REGIR LE CHOIX DES CIR

a) Objet

Les besoins résultant de l'absence ou de l'insuffisance de matériel normalisé, de classifications, de nomenclatures, de réactifs, etc., acceptés sur le plan international, constituent l'un des principaux critères à prendre en considération lors de la désignation d'un CIR en vue d'une étude donnée. Il convient de prendre surtout en considération l'importance ou la fréquence, actuelle ou future, du cas considéré qui n'a pas fait encore l'objet d'une étude adéquate, des différences de fréquence notées d'une région à l'autre et des besoins des programmes de l'OMS.

b) Emplacement

Le choix de l'emplacement est fonction de la présence d'une institution de recherche appropriée, de l'existence d'une documentation et de la facilité avec laquelle on peut avoir accès à cette dernière. S'il existe plusieurs institutions qualifiées pour entreprendre une étude donnée, il convient de tenir compte de la situation géographique afin d'éviter de grouper les CIR dans un nombre restreint de pays.

c) Institution

Le critère individuel le plus important dans le choix d'une institution est de savoir si celle-ci possède un spécialiste particulièrement compétent dans le champ d'étude proposé, qui assumera le rôle de directeur du centre et sera, en même temps que l'institution, responsable du CIR devant l'OMS; il est également essentiel, pour assurer leur coopération, que les autres chercheurs intéressés acceptent le directeur choisi. Un CIR ne peut être désigné tant que le directeur du centre n'est pas connu et que le directeur de l'institution hôte n'a pas donné son consentement.

/...

Parmi les autres conditions qui doivent toujours être réunies avant qu'un CIR puisse être désigné, on peut citer : la présence d'autres spécialistes qualifiés, l'exercice d'activités de recherche pertinentes dans l'institution hôte, l'existence de certaines installations et facilités de base, telles que laboratoires, personnel technique et de secrétariat, matériel, animaux d'expérience (le cas échéant), etc. Il convient également de tenir compte de l'emplacement des centres de référence régionaux et nationaux connexes désignés ou prévus.

Lorsqu'on envisage de désigner une institution pour accueillir un CIR de l'OMS, il faut étudier avec soin les chances d'assurer une certaine continuité dans l'activité des spécialistes responsables. Il importe, toutefois, que le CIR ne dépende pas d'une seule personne, si l'on veut qu'il puisse poursuivre des activités autres que l'élaboration de définitions. En d'autres termes, l'institution hôte proposée doit être suffisamment importante pour assurer la continuité des activités du CIR même si le responsable du centre ou d'autres spécialistes s'en vont. Par le passé, lorsqu'il a été nécessaire de pourvoir à un poste de spécialiste et notamment à celui de directeur d'un CIR, les institutions hôtes ont généralement tenu compte de la nature des fonctions du CIR.

C'est au Directeur général de l'OMS qu'il appartient de décider en dernier ressort des ordres de priorité, des questions à étudier et des institutions à retenir et de définir le rôle exact des CIR.

7. DESIGNATION

Lorsque le Directeur général a approuvé la création d'un CIR de l'OMS au sein d'une institution, on demande au directeur de cette dernière d'approuver cette création. Dans le même temps, le gouvernement intéressé est informé de l'intention de l'OMS de créer ce centre. Ce n'est qu'après que l'approbation du directeur de l'institution intéressée a été reçue qu'une lettre de désignation est envoyée au directeur du futur centre de référence. Cette lettre énonce clairement les fonctions et responsabilités du centre ainsi que les responsabilités de l'OMS à l'égard de celui-ci et indique notamment le montant et la durée probable des subventions annuelles que l'OMS lui versera. Un contrat officiel de service technique, établi sur les formulaires 362 et 363 de l'OMS, et conclu entre l'OMS, le directeur de l'institution et le directeur du centre, vient confirmer cet accord; ce contrat est renouvelé, le cas échéant, tous les ans, sur les mêmes formulaires.

Lorsqu'un CIR ayant des fonctions consultatives et des fonctions de formation a été désigné, tous les bureaux régionaux de l'OMS en sont informés et sont priés de porter à la connaissance des gouvernements de leur région la création du centre, son rôle et les services qu'il pourra fournir aux CRR et CNR.

Les désignations de CIR ayant des fonctions consultatives sont également signalées dans la Chronique de l'OMS en même temps que sont indiqués les services qu'ils peuvent fournir aux CNR.

8. RESPONSABILITES DE L'OMS A L'EGARD DES CIR ET CRR

Subventions

Les subventions fournies par l'OMS aux CIR et CRR s'appliquent uniquement aux travaux du centre de référence. Elles ont pour objet de financer en partie l'acquisition de matériel supplémentaire, de personnel technique, de personnel de secrétariat et d'administrateurs, ainsi que d'installations de formation et l'emballage et la distribution de matériels et de renseignements, et de couvrir toute autre dépense directement liée aux activités du centre; elles ne visent à remplacer aucune des subventions déjà reçues de l'institution hôte.

Les subventions accordées par l'OMS aux CIR et CRR ne portent généralement que sur un an. Un financement ultérieur peut être prévu, sous réserve de l'existence de fonds à cet effet, mais ceci n'engage en aucun cas l'OMS. Un nouvel accord est conclu pour chaque exercice.

Coordination entre centres de référence

Pour assurer une meilleure coordination des travaux, il se peut que l'OMS ait à organiser des réunions de directeurs de CIR et de CRR.

9. RESPONSABILITES DES INSTITUTIONS HOTES A L'EGARD DES CIR DE L'OMS

Les institutions hôtes fourniront gratuitement aux CIR de l'OMS laboratoires et matériel de base, services fondamentaux et personnel (qui en principe doivent être disponibles dès le départ). Ces responsabilités font l'objet d'un échange de lettres avec l'OMS avant que la désignation n'intervienne.

Blank page

Page blanche

Blank page

Page blanche

ANNEXE III

SUPPLEMENT D'INFORMATION FOURNI PAR L'OMM SUR LA POLLUTION DE L'AIR

I. INTRODUCTION

Le problème de la pollution de l'air se présente sous trois aspects principaux :

1. Le phénomène lui-même : sources de pollution, mesure des polluants, dispersion des contaminants dans l'atmosphère, conditions physiques qui rendent la dispersion possible ou impossible, mécanisme d'auto-épuration de l'atmosphère, variations de la concentration des polluants, etc. Il est évident que plus nous en saurons sur la pollution atmosphérique, mieux nous comprendrons le phénomène et plus il nous sera facile d'en combattre les effets. Faute de quoi tous les efforts resteraient vains.

2. Les conséquences de la pollution atmosphérique, dont les plus importantes intéressent les conditions de vie et la santé des hommes. Mais il en existe une autre dont la gravité du fait de son influence sur la vie humaine, échappe à la plupart des gens, et qui réside dans les modifications imposées au temps et au climat par la pollution. Celle-ci, même lorsqu'elle est de courte durée et peu étendue, peut réduire la visibilité et perturber ainsi de nombreuses activités humaines. La pollution atmosphérique à une grande échelle affaiblit l'intensité du rayonnement solaire reçu par la surface de la terre à travers l'atmosphère environnante dont le régime des températures risque, par conséquent, de subir d'importants changements. Les effets de l'éruption de Krakatoa, en août 1883, ont été considérables au point de se faire encore sentir trois ans après; les températures moyennes estivales, notamment, ont baissé de 2° C à 3° C par rapport à la moyenne mensuelle normale. Des recherches récemment effectuées par l'Observatoire de géophysique principal de Léninegrad ont montré que la quantité moyenne de rayonnement solaire reçue par la terre diminuait progressivement depuis 1940. Ce phénomène est probablement dû également à une augmentation de la densité des polluants dans l'atmosphère.

3. La prévention de la pollution atmosphérique qui se présente sous les deux formes brièvement décrites ci-après :

1) Prévention dans des régions où des sources de pollution existent déjà (principalement dans les secteurs très industrialisés).

A cette fin, peut-être pourrions-nous envisager les possibilités suivantes :

/...

- a) Application de techniques nouvelles (filtres, cheminées très hautes, etc.) qui permettraient de réduire autant que possible le degré de pollution de l'air.
- b) Limitation de l'émission de polluants dans l'atmosphère aux seules périodes où les conditions météorologiques se présentent favorablement, c'est-à-dire, par exemple, lorsque de fortes turbulences assurent une rapide dispersion des contaminants.

La première éventualité a) revêt un caractère purement technique, tandis que la seconde b) exige l'application de connaissances spéciales, tant théoriques qu'expérimentales, en météorologie. Elle nécessite également des renseignements d'une exactitude qui ne peut être obtenue que grâce à des mesures météorologiques spéciales. Il faut pouvoir prévoir les conditions météorologiques afin de savoir au moins 8 ou 10 heures à l'avance comment s'effectuera la dispersion des polluants dans l'atmosphère. Une fois encore, ces prévisions nécessitent des connaissances météorologiques spéciales et ne peuvent être établies selon des procédés courants.

2) Prévention (ou, au moins, réduction) de la pollution de l'air dans les régions industrielles dont l'implantation est en cours de projet ou le sera ultérieurement.

Il convient de signaler ici qu'avant l'implantation de toute nouvelle zone industrielle, ou même de toute nouvelle usine, il faut procéder à des études microclimatologiques de la région envisagée. Ces études aideront à délimiter le secteur à inclure dans la zone de planification. Ensuite, on examinera le secteur choisi afin de placer en des points appropriés toutes les sources probables de pollution, ce qui permettra, avant de commencer les plans de construction, de trouver la meilleure solution pour assurer aux habitants de la zone industrielle en question des conditions de vie satisfaisantes.

Le rapport de l'OMS traite essentiellement du second aspect du problème, sans toutefois négliger les deux autres; nous estimons cependant que les récentes acquisitions de la météorologie en matière de pollution atmosphérique autorisent à pousser plus loin la discussion.

C'est pourquoi la contribution de l'OMM à l'étude de ce sujet fait intervenir quelques considérations supplémentaires qui devraient permettre de mieux comprendre l'ensemble du problème, à la lumière d'un certain nombre de faits nouveaux.

II. LES SOURCES DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE

Dans les pays développés comme dans les pays en voie de développement, nombre d'activités essentielles provoquent la pollution de l'air dont les principales sources sont le chauffage des habitations, la production de l'énergie électrique et l'élimination des déchets. Certains types d'installations industrielles peuvent aussi y contribuer dans des secteurs déterminés, mais dans une mesure qui varie d'une région à l'autre et - ce qui est très important - d'un moment à l'autre. L'aggravation continue des problèmes que pose la pollution de l'air au sein de la collectivité provient de faits économiques nouveaux, que ce soit l'implantation de complexes industriels ou la construction de nouveaux quartiers résidentiels.

Dans les régions où la densité des véhicules à moteur est forte, la pollution de l'air par les moteurs à combustion interne (Diesel, en particulier) qui peut atteindre des concentrations élevées, doit faire l'objet d'une attention plus soutenue. Les besoins en énergie ne cessent de croître et de faire augmenter la consommation du combustible Diesel qui assure le fonctionnement des génératrices. La pollution de l'air par l'anhydride sulfureux contenu dans la suie et la fumée sera également aggravée en même temps que les besoins en énergie augmenteront. Il ne fait pas de doute qu'en améliorant les processus de combustion, on parviendra à réduire la première de ces sources de pollution, mais non la seconde. Et il en existe bien d'autres dites "naturelles" parmi lesquelles nous pouvons citer les éruptions volcaniques, les poussières cosmiques, le sel marin (après l'évaporation des gouttelettes d'eau de mer), le "smog", mélange de brouillard et de fumée engendré par les feux de forêt, l'oxyde de carbone dégagé par diverses sources naturelles et notamment les arbres pendant la nuit, et bien d'autres encore.

Les hommes de science estiment que les contaminants d'origine naturelle entrent dans la pollution de l'air pour une part relativement petite comparée à celle des contaminants produits par les activités humaines. Mais il s'agit là d'une hypothèse plutôt que d'un fait reconnu.

III. MESURE DE LA POLLUTION DE L'AIR

Le rapport de l'OMS traite la question de manière approfondie et il y a peu de choses à y ajouter. Mais peut-être serait-il opportun de dire quelques mots de la mesure des polluants en dehors des zones polluées. Pour ce faire, il faudrait

installer quelques stations de base qui, en effectuant des mesures continues, fourniraient des renseignements sur le degré général de pollution de l'atmosphère et évalueraient les modifications à long terme de la composition chimique de l'atmosphère. Il suffirait de 50 à 100 stations pour couvrir la totalité des terres et des mers de notre planète. En ce qui concerne la densité des polluants au niveau des stations terrestres, chaque pays pourrait établir une ou deux "bases" qui mesureraient la pollution à l'échelle nationale puis, suivant l'étendue du pays, on pourrait ultérieurement leur ajouter d'autres stations qui procéderaient aux mêmes genres de mesures, mais à l'échelle régionale. Il faudrait que ces stations de base soient situées le plus loin possible des grands centres urbains et industriels et qu'elles ne subissent l'influence d'aucune petite source locale de pollution atmosphérique. Leur travail consisterait notamment à mesurer les concentrations moyennes hebdomadaires d'anhydride sulfureux dans des échantillons d'air et les concentrations, dans des échantillons de précipitations mensuelles, des principaux constituants suivants : S, Cl, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_3\text{-N}$, Na, K, Mg et Ca. Il serait souhaitable qu'elles mesurent également la concentration d'oxyde de carbone dans quelques endroits choisis où l'on serait sûr d'obtenir des chiffres représentatifs. Les analyses proprement dites pourraient être pratiquées dans un certain nombre de centres spécialisés.

IV. POLLUANTS RADIOACTIFS

La découverte de l'énergie nucléaire, l'invention de la bombe atomique et, plus particulièrement, les essais d'armes nucléaires ont placé l'humanité devant un grave problème : prévenir la pollution de l'atmosphère. Le danger est maintenant devenu évident non seulement aux hommes de science mais aussi au grand public et, depuis cette découverte, on a entrepris de nombreuses recherches tant théoriques qu'expérimentales. Les résultats les plus importants des efforts conjugués menés par les hommes de science de divers pays sont décrits ci-après :

a) Grâce à de nombreuses études théoriques, on est maintenant en mesure de décrire par des formules mathématiques quelques-uns des processus de la diffusion turbulente dans notre atmosphère. Les mathématiques modernes ont permis d'élaborer de nouvelles théories telles que celle de la diffusion des polluants dans l'atmosphère turbulente, celle du flux atmosphérique turbulent autour des obstacles, etc. Les calculatrices électroniques modernes rendent possible l'utilisation de ces modèles théoriques, mais dans certains cas seulement, et elles permettent d'étudier et de calculer le comportement des contaminants émis dans l'atmosphère par des sources ponctuelles isolées, et même par des sources zonales étendues.

b) On a déjà trouvé l'équation de la diffusion turbulente; à l'heure actuelle, elle sert d'équation fondamentale aux recherches théoriques entreprises dans ce domaine particulier.

c) On a étudié la formation de particules dans les débris des bombes nucléaires et la tâche de suivre ces formations après une explosion nucléaire implique des calculs longs et compliqués. Les difficultés se trouvent encore accrues lorsque les résultats, au lieu de recevoir une large diffusion, sont gardés secrets pour des raisons d'intérêt purement national. Le chercheur doit alors se contenter de simples évaluations et risque de devoir continuer à le faire dans l'avenir.

d) Le mécanisme du transport des particules et des débris radioactifs ainsi que des autres contaminants a été à peu près étudié et l'on estime que le vent en constitue le facteur principal. On est maintenant capable de calculer, par des méthodes spécialement mises au point à cet effet, l'étendue des zones touchées.

e) Certains travaux ont porté sur l'expulsion hors de l'atmosphère des poussières radioactives sous l'effet du lavage par les précipitations. On a pris comme équation fondamentale la formule de diffusion, bien connue, de Sutton; on l'a toutefois modifiée depuis pour y faire apparaître le dépôt dû à la fin du lavage. En conséquence, deux formules ont été dérivées de celle de Sutton, l'une pour les sources ponctuelles instantanées et l'autre pour les sources ponctuelles continues. Ces deux formules qui conviennent à des conditions réelles ou supposées, permettent d'évaluer les risques découlant des substances déposées, ou encourus lorsque des nuages aériens se vident des produits radioactifs qu'ils contiennent.

V. CONDITIONS METEOROLOGIQUES ET POLLUTION DE L'AIR

Les conditions météorologiques (la plupart d'entre elles figurent dans le rapport de l'OMS) qui exercent une influence sur la dispersion des polluants atmosphériques peuvent être combinées en formules permettant de calculer les concentrations des contaminants. Il convient toutefois de distinguer entre :

- a) Les sources ponctuelles, comme les cheminées isolées, et
- b) Les sources zonales, telles que les grandes collectivités urbaines.

Dans les deux cas, ce sont la vitesse, le profil et la structure (turbulence) du vent, la stabilité atmosphérique et l'inégalité de la surface du sol qui jouent le rôle le plus déterminant dans la dispersion des polluants. Ces facteurs ne sont utilisés, le plus souvent, que qualitativement, surtout en ce qui concerne la structure du vent, la stabilité de l'atmosphère et l'inégalité de la surface du sol. Dans une certaine mesure, il y a interrelation entre ces trois paramètres. Pour ce qui est des sources ponctuelles, les méthodes qualitatives actuelles de prévision des concentrations probables selon les conditions météorologiques peuvent être considérées comme utiles. L'effet du cisaillement vertical du vent ne figure pas dans ces méthodes et l'on obtiendrait de meilleurs résultats en l'y introduisant.

L'une des autres lacunes réside dans l'absence totale de toute théorie complète sur la montée des gaz effluents chauds dans l'atmosphère. On estime pourtant qu'il serait très utile de mettre sérieusement à l'épreuve les théories existantes. Le calcul des concentrations des polluants émis par des sources ponctuelles se heurte à une autre difficulté qui provient des relations entre les concentrations maximales et les heures d'échantillonnage. Un certain nombre d'études - pour la plupart théoriques - ont été consacrées à ce problème et il serait peut-être utile de leur ajouter un bilan des théories les plus récentes.

L'évaluation du degré de pollution dans les villes constitue un problème toujours plus important et plus complexe du fait de l'extension prise par l'urbanisation dans le monde entier. Les facteurs appliqués aux sources ponctuelles valent également dans ce cas, mais l'inégalité de la surface du sol joue évidemment un rôle plus important. Les renseignements relatifs aux profils du vent et à la stabilité atmosphérique sont, en règle générale, plus difficiles à obtenir dans les zones urbaines que dans les campagnes, et tous les efforts doivent tendre à ce

qu'ils soient aussi complets que possible. On peut aussi évaluer qualitativement la stabilité atmosphérique d'après les variations de la température diurne, et d'après les observations du vent et des nuages.

La concentration de la pollution dans les villes peut, en principe, être déterminée avec une précision ne dépassant pas l'ordre de grandeur, en ayant recours à des calculatrices pour appliquer l'un des modèles existant pour les sources ponctuelles aux diverses sources urbaines, et additionner les résultats obtenus. Ce procédé n'est toutefois utilisable que si l'on connaît l'intensité des sources de pollution des divers quartiers de la ville. Il serait également souhaitable d'obtenir une meilleure estimation des effets de l'inégalité du terrain et de ceux du trafic. L'objection la plus sérieuse que l'on puisse opposer à cette méthode vient de ce que tous les modèles de source ponctuelle deviennent inutilisables lorsque les vents sont faibles et variables, alors que c'est précisément dans cette circonstance que l'air d'une ville présente de fortes concentrations de polluants.

On pourrait également étudier dans quelles conditions météorologiques générales (caractérisées, par exemple, par des types de circulation semblables à ceux que Hess et Brezowsky ont définis pour l'Europe centrale), les fortes concentrations se produisent dans les zones urbaines. Cette méthode semi-empirique a été étudiée par plusieurs pays et l'on estime qu'elle pourrait utilement servir à l'identification des conditions météorologiques qui engendrent de hauts degrés de pollution. Mais là encore, la difficulté réside en ce que les concentrations varient suivant les heures d'échantillonnage. Selon certains des calculs effectués, les concentrations dans les grandes villes tendent à augmenter proportionnellement à la racine carrée du temps, après un brusque accroissement de la stabilité. Bien que ce résultat ait été confirmé par l'évolution du degré de pollution de l'air pendant le grand "smog" de décembre 1952, à Londres, il vaudrait la peine de réunir des renseignements sur les corrélations généralement constatées dans les villes entre la concentration et l'heure d'échantillonnage.

VI. PREVISION DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE

A l'heure actuelle, deux types de prévisions de la pollution atmosphérique sont officiellement reconnus, à savoir :

- 1) Les prévisions météorologiques destinées au génie civil et à la planification urbaine, et
- 2) Les prévisions synoptiques destinées à des alertes diffusées à courte échéance.

Dans la plupart des pays, les prévisions synoptiques ne peuvent, jusqu'à présent, guère rendre de services parce qu'il n'existe aucun appareil juridique susceptible de rendre obligatoire une réduction des émissions de polluants lorsque des conditions météorologiques défavorables sont annoncées. Elles jouent pourtant un rôle utile dans quelques pays où elles servent à alerter les divers services intéressés et à encourager la lutte volontaire contre la pollution. Les services nationaux de santé publique devraient se rendre compte que nombre de services météorologiques nationaux se trouvent en mesure de les aider dans leur tâche en prévoyant les périodes de pollution intense. Voici quelques exemples de cette forme d'assistance :

Aux Pays-Bas, la pollution n'atteint des niveaux critiques que trois ou quatre fois par an, aussi n'est-il pas facile d'établir des prévisions régulières. Les services municipaux surveillent constamment la concentration d'anhydride sulfureux et, si elle dépasse un certain niveau, ils demandent conseil au service météorologique.

Au Royaume-Uni, on diffuse plusieurs types de prévisions. L'un des hôpitaux de Londres reçoit un avis spécial lorsque le Bureau météorologique prévoit que la concentration d'anhydride sulfureux dans ce secteur va dépasser 1 000 microgrammes par mètre cube. Cette prévision locale est fondée sur une formule empirique qui comporte les variables suivantes :

- a) L'intensité de l'inversion à basse altitude,
- b) La température minimale nocture,
- c) La vitesse du vent,
- d) L'importance de la nébulosité.

Si l'on s'attend à ce que le "smog" persiste pendant environ 24 heures, on lance un avis de brouillard persistant à la population en la priant de régler ses feux de charbon de manière à réduire l'émission de fumée.

Aux Etats-Unis, le Centre météorologique national établit au moyen de calculatrices électroniques des prévisions de "pollution potentielle", terme qui désigne la capacité de dispersion et de ventilation de l'atmosphère, qu'il existe ou non des sources de pollution. Ces prévisions sont fondées sur un système qui fait intervenir le gradient vertical de température relevé lors des radiosondages, les vents moyens en altitude observés lors des radiovents, les vents aux basses altitudes et l'épaisseur de la couche de mélange, cette dernière étant associée à une prévision de la température maximale. Parfois, lorsque les conditions météorologiques d'échelle synoptique sont correctement prévues, des facteurs locaux tels que les caractéristiques orographiques et les brises de lac et de terre créent une ventilation qui évite la formation de concentrations élevées de polluants.

Nombreux sont les pays (parmi lesquels figurent notamment le Canada, les Pays-Bas, la Suède, le Royaume-Uni, les Etats-Unis d'Amérique et l'URSS) où l'on sollicite l'aide des services météorologiques pour localiser les nouvelles sources de polluants. On établit les prévisions climatologiques en faisant le rapport entre le taux d'émission et la hauteur de la cheminée d'une part, les facteurs de dispersion dans l'atmosphère et la distribution climatologique du vent, d'autre part. A cet égard, il serait très utile que l'on multiplie les études climatologiques sur les facteurs de dispersion.

VII. AUTO-EPURATION DE L'ATMOSPHERE

Bien que l'on en sache peu de choses, il ne fait pas de doute qu'il existe des processus d'auto-épuration de l'atmosphère et c'est là une grave lacune dans nos connaissances relatives à la pollution atmosphérique en tant que phénomène. Nous avons pourtant quelques notions des processus chimiques susceptibles de purifier l'air. Nous savons aussi que la pesanteur peut faire très lentement descendre la poussière de l'atmosphère et nous avons également quelque idée des processus de lavage de l'atmosphère par les précipitations. Mais c'est trop peu.

Il faudrait donc consacrer une attention particulière à l'étude des processus d'auto-épuration de l'atmosphère, car lorsque nous les connaissons, nous serons bien mieux armés pour prévenir la plupart des conséquences de la pollution de l'air.

VIII. DOMMAGES CAUSES A LA VEGETATION PAR LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE

Un certain nombre de polluants dont quelques-uns peuvent ne se trouver dans l'atmosphère qu'à des concentrations relativement faibles, ont une influence considérable sur la vie végétale. La sensibilité des différentes espèces, et même des diverses variétés d'une même espèce, varie parfois énormément. Mais les enquêtes ont montré que les pertes économiques engendrées, directement et indirectement, par les dommages que la pollution de l'air cause à l'agriculture, sont importantes et qu'elles augmentent dans maintes parties du monde. Afin de donner à cet aspect particulier de la pollution atmosphérique toute l'attention qu'il mérite, la Commission de la météorologie agricole de l'OMM a créé un groupe de travail spécialement chargé d'étudier les dommages à la végétation et la baisse de rendement causés par les contaminants non radioactifs. Parmi les points traités par le groupe de travail dans son premier rapport, nous citerons ceux-ci :

L'étude des dommages causés à la végétation par les polluants atmosphériques est fructueuse non seulement en elle-même, mais aussi en ce qu'elle s'applique à divers autres problèmes de pollution de l'air. Le fait que des contaminants dont la concentration est trop faible pour qu'ils puissent être facilement décelés par les instruments et les procédés d'analyse chimique actuellement à notre disposition sont nuisibles pour certaines espèces de plantes, pourrait servir à l'identification de ces substances. Zimmerman^{a/} fait observer que certaines plantes réagissent à la présence d'éthylène à des concentrations ne dépassant pas une partie pour 100 millions et donc très difficiles à déceler pour les chimistes.

Il n'est pas rare que les réactions de la végétation aient fourni la première indication d'un problème de pollution atmosphérique dans une région. Etant donné que des symptômes caractéristiques et faciles à reconnaître apparaissent chez les plantes lorsqu'elles sont exposées à de faibles concentrations de certains polluants, ce phénomène pourrait servir de moyen de contrôle de la pollution de

l'air et constituer un instrument précieux pour les enquêtes sur le terrain. Cependant, la réaction d'une plante à une concentration donnée est étroitement liée à une multitude de facteurs de milieu, aussi la végétation n'est-elle pas toujours un bon contrôleur de la pollution atmosphérique.

Les études expérimentales de la végétation ont indiscutablement leur place dans l'évaluation d'un problème de pollution de l'air, mais leurs limites, pourtant évidentes, sont souvent méconnues. La première réside dans le fait que nous ne savons reconnaître et identifier les effets que de cinq polluants majeurs : le dioxyde de soufre, le fluorure, l'éthylène et deux des éléments qui entrent dans la composition complexe du "smog". En second lieu, nous sommes dépendants de l'existence de variétés sensibles, ayant atteint un stade de croissance sensible au moment où elles sont exposées à des concentrations suffisantes pour leur être nuisibles. Enfin, il faut qu'un observateur compétent se trouve sur place au moment voulu pour étudier les symptômes dès leur apparition et avant que d'autres changements ne risquent de les cacher. Nous ne devons jamais oublier que la végétation est un récepteur dont les réactions varient en fonction d'une multitude de conditions préalables. La constatation d'un dommage susceptible d'être attribué à un polluant déterminé prouve probablement l'existence d'un important problème de pollution, mais l'absence de symptôme ne signifie pas nécessairement qu'il n'y ait pas de problème.

La végétation peut aussi jouer un rôle utile comme moyen de contrôle de la pollution, avec les mêmes réserves que celles qui s'appliquent à son utilisation comme instrument d'étude. Nous envisageons souvent de nous servir de plantes soit spécifiquement indigènes, soit plantées spécialement pour jouer le rôle de moyen de contrôle. Mais si nous omettons de tenir compte de tous les facteurs susceptibles de modifier les réactions de la plante - l'instrument - au polluant, nos données ne seront pas fiables. Pour qu'elles le soient, il faut que le système bénéficie d'un personnel et d'une protection adéquats, et que les données rassemblées soient interprétées sur la base d'une parfaite compréhension et d'une exacte évaluation de tous les facteurs qui pourraient exercer une influence sur les réactions des plantes. A cet égard, la végétation ne diffère en rien de n'importe quel autre instrument de contrôle.

L'utilisation des plantes comme témoins du transport et de la dilution des polluants dans l'atmosphère intéresse le météorologiste. L'observation des dommages causés aux plantes et des conditions météorologiques aide à identifier les sources de pollution, ce qui est particulièrement utile lorsque les dommages sont cumulatifs (dans le cas des fluorures, par exemple). Si l'on connaît la source des émissions de contaminants, les dégâts subis par la végétation et les conditions météorologiques, il devient possible de former des estimations concernant les mécanismes de dilution.

Effets des polluants sur la croissance et la productivité des plantes

L'arrêt de la croissance et la diminution de la productivité des plantes qu'engendre la pollution atmosphérique sont dus, en grande partie, à l'action des contaminants sur la physiologie de la plante elle-même. Ces dommages perturbent quelques-uns ou la totalité des processus normaux (photosynthèse, respiration, transpiration, perméabilité cellulaire, etc.) essentiels à la croissance de la plante.

La photosynthèse est un processus selon lequel une matière organique est produite à partir du gaz carbonique et de l'eau, sous l'effet de la lumière. Lorsque l'activité photosynthétique est réduite, la quantité des produits qui en résultent diminue, alors que ce sont les constituants de toute la substance sèche des plantes. D'après Todd et al.^{b/}, des lentilles d'eau (Lemna minor) soumises à des fumigations au moyen d'un oxydant* (hexène ozoné), c'est-à-dire d'un polluant, à la dose de 0,02 partie par million, ont manifesté une intolérance visible et leur photosynthèse s'est trouvée réduite de 10 p. 100 environ au bout de 4 heures, et de 67 p. 100 au bout de 24 heures. La destruction de la chlorophylle qui peut entraîner l'arrêt de la photosynthèse, a atteint les chiffres respectifs de 4 p. 100 et 49 p. 100. A la dose de une partie par million, les fumigations d'ozone ont provoqué une réduction de la photosynthèse de 5 p. 100 au bout de 4 heures, et de 38 p. 100 au bout de 24 heures; la chlorophylle a été détruite dans la proportion de 5 p. 100 et 40 p. 100 respectivement. Il semble donc que la réduction de la photosynthèse et, en fin de compte, la croissance et la productivité des plantes, soient fonction du genre auquel appartient l'oxydant. Les mêmes auteurs ont constaté qu'en soumettant des citrons à des fumigations d'oxydant, on

* Dans toutes les remarques relatives aux concentrations d'oxydant, les valeurs sont ramenées à celles que donnerait la méthode de mesure par une solution d'iodure de potassium tamponné neutre, exprimées en ozone. /...

provoquait une accélération de la respiration. Or c'est par ce processus que les organismes végétaux utilisent les produits de la photosynthèse pour libérer l'énergie nécessaire à d'autres processus vitaux. On ne sait pas dans quelle mesure cette stimulation de la respiration peut être nuisible, mais il est certain qu'elle entraîne une consommation inutile d'hydrates de carbone. Erickson et Wedding^{c/} qui, au cours de leurs expériences, ont soumis des lentilles d'eau (Lemna minor) à des fumigations d'hexène ozoné, ont déclaré que l'arrêt de la photosynthèse était lié dans une certaine mesure à l'augmentation de la perméabilité puis à la mort des cellules et que, pourtant, la réduction de la photosynthèse était beaucoup plus grande que l'augmentation de la conductibilité cellulaire.

D'après Taylor^{d/}, on a réduit d'environ 25 p. 100 la transpiration indispensable à la croissance et au développement des plantes, en soumettant des boutures et des scions de citronnier à des fumigations de "smog" artificiel.

La croissance de jeunes plants de tomates, de chicorée et de luzerne exposés à un "smog" naturel, a été ralentie sans que les feuilles portent de lésions visibles. Hull et Went^{e/} ont signalé qu'en l'absence de tout dommage apparent, le taux de croissance de plants de tomates soumis durant 3 heures par jour à des fumigations de "smog" artificiel, avait diminué de 49 p. 100 pendant le premier jour qui a suivi le traitement. Taylor^{d/} a observé que les feuilles de plusieurs variétés de fèves avaient été presque complètement détruites après qu'on les ait soumises pendant une journée à des fumigations d'oxydant dosé à 0,15 - 0,20 partie par million. Par contre, les feuilles de pétunias exposées chaque jour à du "smog" artificiel n'ont montré que de faibles détériorations, bien que le taux de croissance des plantes au cours des 3 semaines qu'a duré l'expérience, ait diminué de près de 50 p. 100, et que la formation des fleurs ait complètement cessé. L'exposition à du "smog" naturel a donné des résultats analogues, mais avec de moindres dégâts. Au contact du "smog" naturel, 60 p. 100 des bourgeons de tomates n'ont pu se développer, tandis que sur des plantes cultivées dans de l'air filtré sur charbon activé, presque toutes les fleurs donnaient des fruits. Après que des plants de citronnier de Lisbonne aient été soumis pendant trois mois à des fumigations quotidiennes d'un oxydant synthétique dosé à 0,15 - 0,20 partie par million, le poids à l'état frais de la partie aérienne de la plante a diminué

d'environ 31 p. 100, et son poids sec de 35 p. 100 environ, sans que l'on ait constaté de lésions typiques dues au "smog". Mais la chlorose a fait son apparition au bout de 2 mois environ. Les plantes ainsi traitées ont perdu 135 feuilles, alors que celles qui avaient poussé dans de l'air non pollué n'en ont perdu que 14.

L'effet inhibiteur de l'oxyde de carbone sur la croissance des végétaux est exclusivement dû à la destruction du tissu foliaire et par conséquent à une réduction de la surface disponible pour la photosynthèse. D'après une première estimation approximative des quelques récoltes étudiées, Thomas^{f/} considère que la baisse de rendement exprimée en pourcentage du rendement d'une récolte indemne, varie en fonction linéaire du pourcentage de la surface totale de feuillage endommagé lors des fumigations. En ce qui concerne la luzerne, cela paraît valable quel que soit le stade de croissance auquel les fumigations aient été effectuées, et l'effet de fumigations répétées est cumulatif. Par contre, pour le blé, l'orge, les tomates, le maïs et le coton, la baisse de rendement semble plutôt dépendre du stade de développement atteint par la plante au moment des fumigations. Les fumigations pratiquées au début de la croissance de l'orge ont eu peu d'effet sur le rendement de la récolte mais, pratiquées à un stade ultérieur, toutes les feuilles ayant été détruites, le rendement a diminué de 40 p. 100. En ce qui concerne le blé, lorsque les fumigations ont été accompagnées d'une défoliation complète, la baisse de rendement a varié entre 8 p. 100 pour les traitements effectués pendant la septième semaine de la croissance, et 35 p. 100 pour ceux pratiqués entre la dixième et la quatorzième semaine. Elle s'est révélée presque insignifiante lorsque le blé poussait dans un sol suffisamment fertile.

Dans un rapport sur des études consacrées à l'effet de l'anhydride sulfureux sur des conifères, Katz et McCallum^{g/} disent avoir constaté chez des arbres dont le feuillage avait été abîmé trois ans auparavant, une relativement faible diminution du taux de croissance des feuilles. Chez les sujets gravement atteints, une partie des branches est morte. La croissance en hauteur des sapins de Douglas et des cembros a diminué, surtout en ce qui concerne les premiers, pendant environ trois ans après qu'ils aient été traités à l'anhydride sulfureux. Par la suite, ils se sont bien rétablis.

Le fluorure d'hydrogène peut causer des dommages considérables à un grand nombre de plantes. D'après Todd et Garber^{h/}, l'arrêt de la croissance ne se produit que lorsqu'il y a des lésions visibles, et il est probablement dû à une diminution de la capacité de photosynthèse. Des fumigations pratiquées pendant une période de 30 jours avec du fluorure d'hydrogène à raison de 10 parties par milliard, ont provoqué chez diverses variétés de vigne une défoliation considérable. Des glaieuls, soumis au même traitement, sont devenus moins florifères. Thomas et Hendricks^{i/} signalent que la chute des feuilles, chez des arbres tels que pommiers, abricotiers, pruniers, pêchers et figuiers, peut atteindre de 25 à 50 p. 100 lorsque la moitié des feuilles ont été endommagées par le fluorure d'hydrogène; il arrive même que ces arbres perdent leurs fruits la première année et n'en portent pas les années suivantes. Adams et al.^{j/} ont constaté que les aiguilles lésées de pins Pouderosa n'atteignent que les trois quarts de leur longueur normale si les lésions interviennent avant leur plein développement, et que leur durée de vie est plus courte.

Les aérosols acides et les brumes toxiques produisent des taches de dimensions variables sur le dessus des feuilles et endommagent les fruits, tandis que les particules solides telles que les poussières de charbon et de ciment maculent parfois les fruits et les légumes.

Il arrive que des récoltes puissent être toxiques pour l'homme et l'animal si le sol a été contaminé par des substances telles que le plomb ou l'arsenic, et le rendement sera également moins bon. Ce sont le pr. H. V. Warren de l'Université de la Colombie britannique et Mlle Helen Cannon de l'U.S. Geological Survey qui ont découvert que les plantes absorbaient le plomb contenu dans le sol. Normalement, elles n'en contiennent que de 10 à 75 parties par million, mais au voisinage d'importants gisements de minerai de plomb, les concentrations peuvent s'élever jusqu'à 4 000 parties par million. On trouve également du plomb à des taux élevés dans les plantes qui poussent dans l'atmosphère de brouillard et de fumée des villes, et dans les zones situées à moins de 1,50 m des grandes routes. Dans ce dernier cas, le plomb provient probablement des gaz d'échappement des automobiles.

Les articles de Guderian et al.^{k/} et de Treshow^{l/} constituent un excellent aperçu des problèmes de la reconnaissance et de l'évaluation des effets de la pollution, tandis que Landau et Brandt^{m/} examinent celui de l'estimation des pertes

économiques. Dugger et al.^{n/} et McCune et al.^{o/} présentent quelques-uns des problèmes que pose l'appréciation des réactions physiologiques et biochimiques. Heck et al.^{p/} évoquent ceux que soulève l'évaluation de l'influence exercée par les autres facteurs de milieu sur la réaction des plantes aux polluants atmosphériques.

On ne connaît pas le montant total des pertes économiques qu'entraînent les dommages causés aux plantes par la pollution de l'air, et peut-être n'est-il pas possible de le savoir car, en plus de celles qu'engendre la destruction de la végétation, il en est un certain nombre - directes et indirectes - qu'il n'est guère possible d'estimer. On ne sait, par exemple, pas dans quelle mesure la croissance se trouve réduite. Avant la guérison, il se produit une diminution faible mais peut-être significative de l'assimilation, que l'on ne peut évaluer; l'action des particules solides et leur effet direct sur la végétation sont préoccupants, mais on en sait peu de choses. On pourrait peut-être parfois fournir une indication approximative des pertes encourues du seul fait de la destruction des plantes dans certaines circonstances précises. Brandt^{q/} situe entre 6 et 10 millions de dollars celles que subit annuellement la Californie dans la région de Los Angeles. Mais il fait observer que n'entrent pas dans ce chiffre les effets possibles sur la croissance des plantes, la valeur des produits des potagers individuels, les pertes de plantes d'ornements, et d'autres effets marginaux. Darley et al.^{r/} estiment que les Etats-Unis d'Amérique encourent chaque année une perte de plus de 25 millions de dollars. Thomas et Hendricks^{i/} considèrent qu'au Texas, les pertes en coton dues aux pulvérisations d'insecticides pratiquées sur des rizières situées à au moins 15 ou 20 milles du champ de coton le plus proche, se montent à 200 000 dollars. Au Canada, des millions de livres de tabac séché dans des étuves à gaz chauds ont perdu toute valeur commerciale du fait de leur pollution par un oxydant, soit une perte de plus de 6 millions de livres en 1957 dont la majeure partie a été encourue sur le tiers environ de la surface totale de culture du tabac. Un fermier a perdu les deux tiers de sa récolte et plusieurs autres le tiers ou la moitié.

Malgré les enquêtes approfondies qui ont été menées et les progrès que l'on a réalisés, l'état actuel de nos connaissances en matière de pollution atmosphérique laisse encore beaucoup à désirer et de nombreux aspects du problème nous restent insuffisamment connus. Nous ignorons encore l'identité de la plupart des contaminants que l'air véhicule ainsi que leurs effets réels sur la végétation. De plus, on n'a pas encore établi la correspondance exacte entre l'apparition de lésions visibles - manifestations nécrotiques et/ou chlorotiques reconnaissables - et les polluants atmosphériques qui en sont responsables. Par ailleurs, on sait que certains contaminants provoquent des réactions précises qui perturbent la croissance, la floraison, la nouaison des fruits et d'autres processus physiologiques. Ce genre de dommage est plus répandu qu'on ne le pense communément. Les lésions faciles à discerner ne constituent probablement qu'une indication générale, sans donner l'exacte mesure de l'ensemble des dommages causés à la végétation par les polluants atmosphériques. Les lacunes de nos connaissances proviennent également du manque d'instruments fiables et précis nous permettant d'échantillonner et d'analyser les diverses substances chimiques qui polluent l'atmosphère et de mesurer les paramètres météorologiques essentiels qui interviennent dans le phénomène.

IX. REMERCIEMENTS

Nous avons eu recours, pour la rédaction du présent article, à des extraits de publications de l'OMM telles que "Turbulent Diffusion in the Atmosphere" (Note technique No 24 - Rapport d'un groupe de travail de la Commission technique de l'aérodologie de l'OMM, 1958) et "Meteorological Aspects of Atmospheric Radio-Activity" (Note technique No 68 - Supplément à la Note No 24, 1965), ainsi qu'aux rapports des divers groupes de travail qui s'occupent de la pollution de l'air.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- a) Zimmermann, R. E., 1952 - General Session on Agricultural Panel, Proceedings of the United States Technical Conference on Air Pollution, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York.
- b) Todd, G. W., Middleton, J. T. and Brewer, R. F., juillet 1956 - Effects of Air Pollutants, California Agriculture Vol. 10, No 7, pages 7-8.
- c) Erickson, L. C. and Wedding, R. T., janvier 1956 - Effects of Ozonated Hexene on Photosynthesis and Respiration of Lemna minor, American Journal of Botany, Vol. 43, No 1, pages 32-36.
- d) Taylor, O. C., 1958 - Air Pollution with Relation to Agronomic Crops : IV Plants Growth Suppressed by Exposure to Air-Borne Oxidants (Smog), Agronomy Journal, Vol. 50, pages 556-558.
- e) Hull, H. M. and Went, F. W., 1952 - Life Processes of Plants as Affected by Air Pollution, Proceedings of the Second National Air Pollution Symposium, Los Angeles 17, California, U.S.A., pages 122-128.
- f) Thomas, M. D., 1958 - Air Pollution with Relation to Agronomic Crops : I General Status of Research on the Effects of Air Pollution on Plants, Agronomy Journal, Vol. 50, pages 545-550.
- g) Katz, M. and McCallum, A. W., 1952 - The Effects of Sulphur Dioxide on Conifers, Air Pollution - Proceedings of the United States Technical Conference on Air Pollution, Chap. 9, pages 84-94, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York.
- h) Todd, G. W. and Garber, M. J., décembre 1958 - Some Effects of Air Pollutants on the Growth and Productivity of Plants, The Botanical Gazette, Vol. 120, No 2, pages 75-80.
- i) Thomas, M. D. and Hendricks, R. H., 1956 - Effects of Air Pollution on Plants, Air Pollution Handbook, Chap. 9, pages (9-1) - (9-44), McGraw-Hill Book Co. Inc., New York.
- j) Adams, D. F., Maydew, D. J., Gnazy, R. N., Richey, E. P., Koppe, R. K. and Allen, I. W., 1952 - Atmospheric Pollution in the Ponderosa Pine Blight Area, In. Eug. Chem. 44, pages 1356-1365.
- k) Guderian, R., Van Haut, H. und Stratmann, H., 1960 - Probleme der Erfassung und Beurteilung von Wirkungen gasformiger Luftverunreinigungen auf die Vegetation, Zeitschrift Pflanzenkrankheiten, Vol. 67, pages 257-264.
- l) Treshow, M., 1965 - J. Air Poll. Cont. Assoc. 15, 266.

- m) Landau, E. and Brandt, C. S. - J. Amer. Statistical Assoc. (sous presse).
- n) Dugger, W. M., Taylor, O. C., Thompson, C. R. and Cardiff, E., 13 (9) septembre 1963 - The Effect of Light on Predisposing Plants to Ozone and Pan Damage, J. Air Poll., pages 63-87.
- o) McCune, D. C., Weinstein, L. H., Jacobson, J. S., Hertagh, A. D. and Hitchcock, A. E., juin 1965 - Paper No 65-99, 58th Annual Meeting APCA, Toronto, Canada.
- p) Heck, W. W., Dunning, J. A. and Hindawi, I. J., 1965 - J. Air Poll. Control Assoc., 15, 511.
- q) Brandt, C. S., 1962 - Effects of Air Pollution on Plants. Air Pollution, Vol. 1, Chap. 8, pages 255-281, Academic Press, New York.
- r) Darley, E., Dugger, W. M., Mudd, J. B., Ordin, L., Taylor, O. C. and Stephens, E. R., 1963 - Plants Damages by Pollution derived from Automobiles, Archives of Environmental Health, Vol. 6, pages 761-770.
