

# Conscience scientifique face à l'environnement atmosphérique(\*)

Par **M. NICOLET**

On a déjà beaucoup épilogué sur la science et ses problèmes depuis qu'il fut de bon ton de poser des « questions aux savants ». En effet, ceux-ci ne risquaient-ils pas de broyer par une science déshumanisée de paisibles consciences contrariées dans leurs rêves de félicité au sein d'une atmosphère bienfaitrice convenant à leurs appétences.

Dans son livre publié en 1969 et intitulé « Questions aux Savants » Pierre-Henri Simon de l'Académie française n'écrivait-il pas qu'il y avait des questions que l'homme d'aujourd'hui était en droit de poser aux savants, en particulier celles qui tiennent, entre autres choses, « aux périls qu'il voit suspendus en un type de société constituée sur les données de la science et sur leurs applications à la technique ». A ce genre de questions, un critique littéraire d'un quotidien pouvait ajouter en conclusion de son analyse : « Entraînée quasi de force par les savants qui prétendent la diriger, la piétaille renâcle et elle revendique, comme Pascal l'y invite, la liberté et la dignité du roseau pensant ».

Dès lors, si de tels entretiens intellectuels, qui conduisent ainsi à opposer erronément l'imagination créatrice à l'intelligence pure, ou à assimiler même symboliquement la communauté scientifique à une synarchie, sont à la base des critères de jugement qui ont conditionné l'opinion publique, on doit prêter une attention à certains actes qui se sont manifestés au cours de la dernière décennie.

Tout d'abord, on a prôné, sous des formes subtiles ou ambiguës, le primat du pragmatisme en faisant croire au marasme de l'intellect-

---

(\*) Discours prononcé à la séance publique annuelle de la Classe des Sciences de l'Académie Royale de Belgique le mardi 16 décembre 1975 et publié dans le Bulletin.

tualisme. L'intelligence des affaires ne devait-elle pas l'emporter sur la force de la cognition et ainsi la « République » ne devait pas être celles des « ingénieurs, des technocrates ni même des savants » comme si ces derniers étaient imprégnés de préjugés machiavéliques. On arrivait donc par des pirouettes dialectiques, à mixtionner le monde des idées avec la commercialisation du savoir tout en identifiant le caractère révolutionnaire de la science, qui résulte purement de ses découvertes, au danger que la connaissance pouvait faire courir à la société par des retombées en quelque sorte maléfiques.

N'ayant pas maîtrisé les besoins de la recherche fondamentale sur la structure de l'atome, le politique a su prendre sa part dans le domaine de la science spatiale en la subordonnant, à l'aveuglette en Europe occidentale, par l'application. Récemment encore, avant le développement de la crise économique actuelle, il avait choisi comme cheval de bataille les problèmes de l'environnement comme si on devait à la science la pollution, les nuisances et la dégradation des conditions de vie, tout en oubliant que la technique sans déchet aurait dû s'organiser légalement avec la conception du produit industriel, sa fabrication et le traitement des résidus. Ainsi, tout se présentait à la masse comme une astucieuse forme de récupération du pouvoir de l'adresse du malin sur le savoir-faire de l'intelligent qui faisait ainsi apparaître le scientifique comme hésitant entre le privilège et la mauvaise conscience et l'obligeant en quelque sorte à cautionner la probité de sa position intellectuelle.

En somme, pour satisfaire aux besoins de la gérance, il s'agit pour le scientifique d'aujourd'hui de simplifier à outrance sa proposition d'exploration de l'inconnu de sorte que toutes ses actions apparaissent se ramener à des activités professionnelles ne réclamant que par hasard l'exercice d'un acte créateur. C'est la reprise en main de la recherche scientifique avec une extension inattendue par ses effets restrictifs à tous les domaines du savoir même à ceux qui peuvent éblouir un certain nombre sans devoir convaincre la multitude. C'est ainsi qu'il est possible de comprendre aisément pourquoi il ne suffit plus à l'Université d'aujourd'hui de laisser ses portes ouvertes, car elle doit montrer jusqu'où elle peut aller en descendant dans la rue afin de rencontrer les échelons supérieurs du pouvoir.

\* \* \*

Afin d'illustrer mon propos, je vais me concentrer pendant quelques minutes sur un sujet déterminé plutôt que de tenter de multiplier les exemples en allant les emprunter à diverses disciplines.

Il s'agit, en effet, d'un des problèmes que l'on pose actuellement à la communauté scientifique, celui de l'ozone atmosphérique. Alors que notre Académie, au même titre que d'autres académies et diverses institutions de tous pays, recevait, au mois d'août de cette année, une lettre se voulant éducatrice du Président de l'Académie des Sciences des Etats-Unis concernant le problème de l'ozone stratosphérique, un texte éducatif intitulé « Les aspects légaux et institutionnels dans le cadre international du problème de l'ozone stratosphérique » était établi pour le Sénat américain et était, à la même date, publié par l'Imprimerie du Gouvernement des Etats-Unis.

Dans ce problème de l'ozone, l'argument utilisé est simple. L'ozone atmosphérique, situé en majeure partie dans la stratosphère, dépend d'un équilibre fragile dont la balance est assurée par sa formation photochimique et sa destruction chimique. Comme l'ozone limite la pénétration du rayonnement ultraviolet solaire abiotique, toute modification qui pourrait être apportée aux conditions aéronomiques naturelles de la couche d'ozone stratosphérique serait grave. C'est le cas aujourd'hui de la pollution industrielle de diverses origines qui, par des réactions additionnelles destructives de l'ozone, va troubler l'équilibre biologique terrestre sous de multiples aspects. Les menaces le plus souvent soutenues sont celles résultant de l'introduction des oxydes d'azote dans la stratosphère par une flotte d'avions supersoniques volant à ces altitudes et l'intrusion dans la stratosphère de composés du chlore produits par l'industrie, en continuelle expansion, des hydrocarbures chlorés utilisés essentiellement dans les vaporisateurs et les réfrigérateurs d'aujourd'hui. Le bromure de méthyle employé comme désinfectant du sol en agriculture tout comme les fertilisants azotés sont à placer en réserve de « danger à prédire ». Si l'on veut clore la boucle, peut-être dans un cadre dramatique, on affirme que le cancer de la peau est étroitement lié à l'ultraviolet solaire de courtes longueurs d'onde atteignant le sol et que dès lors tout pourcentage de diminution de l'ozone atmosphérique provoquant l'accroissement de cet ultraviolet doublerait le pourcentage d'augmentation de cancers de la peau.

Comme les lignes aériennes sont intercontinentales, que l'industrie des hydrocarbures chlorés est multicontinentale et que l'agriculture est internationale, il a donc été proposé de légiférer à plus ou moins brève échéance à l'échelle du Globe, mais en effectuant immédiatement les recherches scientifiques requises à l'échelle planétaire. C'est ce que les Etats-Unis, vivant dynamiquement l'événement, ont décidé énergiquement avec imagination et que l'Ancien Continent, plongé naturellement dans son passé, constatera candidement sans surprise.

\* \* \*

Il y a cent trente-cinq ans, dans une lettre adressée de Bâle à Paris, Schoenbein (1840) écrivait à Arago à propos de l'odeur qui se manifestait dans certaines actions chimiques, qu'il s'agissait d'une substance élémentaire et proposait de lui donner le nom d'ozone ( $\delta\zeta\epsilon\iota\nu$  = sentir). Schoenbein ne parvint jamais à identifier l'ozone et c'est de la Rive qui, en 1845, annonça de Genève, à Arago également, que l'ozone ne pouvait provenir que de l'oxygène parfaitement pur alors que l'aboutissement de cette idée était publié sous le seul nom de Marignac (1845). Ce fut enfin Soret qui, encore de Genève, proclama en 1863 que si la molécule d'oxygène ordinaire à l'état gazeux était formée de la réunion de 2 atomes O et O, comme l'admettait un grand nombre de chimistes et de physiciens déjà à cette époque, on pouvait concevoir qu'une molécule d'ozone fut composée de trois atomes OOO. Que de temps gaspillé (25 ans) pour ne découvrir que des choses aussi simples pourrait dire un argentier moderne dans son plaidoyer pour l'économie. Mais, également quelle pauvre culture - dira quelqu'un d'autre dans son plaidoyer du passé et dans sa critique du présent où tout semble s'effacer en ne laissant subsister comme enluminaire que des noms ignorés et des évidences absorbées aujourd'hui dans la vie quotidienne. On oublie trop souvent, en effet, que la véritable science ne reconnaissant que la vérité objective ne retient que les acquisitions valables en les incorporant par addition aux données définitives du passé qui subsiste indiscutablement dans le présent. C'est toujours par une progression ininterrompue, en tout cas sans jamais de régression malgré l'un ou l'autre arrêt dans la découverte, que la science à travers les temps unit l'imagination créatrice à l'interprétation rationnelle.

A la suite des travaux chimiques de Houzeau, échelonnés de 1857 à 1872, la présence de l'ozone dans l'air au sol fut détectée et observée partout. Au cours de cette période, en 1865, l'Académie des Sciences de Paris créa même une commission spéciale en vue d'examiner les trop nombreuses communications relatives à l'ozonométrie. A cette époque, la Belgique ne fut pas à la traîne, car, sous des impulsions généreuses liées aux problèmes de la santé, plus de 150 stations d'observation munies de leur « papier coloré » avaient été disséminées dans les villes et les campagnes et avaient fourni des données pendant plus de douze ans. Malheureusement, tout ce déploiement d'énergie avait été accompli en vain, car on n'a pu attribuer, dans la suite, aucune valeur aux résultats d'observation. En fait, les observations les plus élaborées furent effectuées pendant quelque trente ans (de 1877 à 1907) tous les jours sans interruption au Parc Montsouris à Paris.

Comme cette détection chimique de l'ozone comportait à la fois des erreurs par défaut ou par excès, on n'a pu accorder, en fin de compte, qu'une valeur médiocre à ces résultats. Les observateurs de l'Observatoire du Parc Montsouris s'étaient d'ailleurs aperçus, par leurs études critiques, que des composés oxydants pouvant apparaître dans l'air exagéraient accidentellement le poids de l'ozone trouvé et que d'autres gaz réducteurs pouvaient affaiblir le taux calculé d'ozone au niveau du sol.

On pourrait dire que l'aboutissement de toutes ces recherches chimiques sur l'ozone au sol pendant un quart de siècle n'a pas été un résultat rentable suivant les critères administratifs actuels. Mais, des trésors d'ingéniosité dépensés à ces occasions ont été valorisés par les recherches spectroscopiques naissantes au cours de la même époque. C'est d'abord Chappuis qui, en 1880, annonce qu'il a observé le spectre d'absorption de l'ozone par un spectre de bandes dans le visible et qu'il les a comparées aux bandes telluriques. C'est ensuite Hartley qui détecte au laboratoire, en 1881, la forte bande d'absorption de l'ozone dans l'ultraviolet au-dessous de  $0,3 \mu\text{m}$  (microns). En même temps, il annonce que la limite ultraviolette du spectre solaire, observée par Cornu en 1879, est due à l'ozone atmosphérique qui doit être, selon l'auteur, situé non au niveau du sol mais à une certaine altitude dans l'atmosphère. Ainsi, il y aura bientôt cent ans que Hartley découvrait cette limite à l'ultraviolet solaire abiotique dont on fait souvent grand cas aujourd'hui même dans les quotidiens. Néanmoins, le domaine spectral, où est filtré le rayonnement solaire de longueurs d'onde supérieures à  $0,3 \mu\text{m}$ , appelé aujourd'hui domaine des bandes de Huggins, ne fut observé par Huggins qu'en 1890 dans le spectre de Sirius et, en fin de compte, ne fut attribué par Fowler et Strutt à l'ozone atmosphérique qu'en 1917. Faut-il terminer ici, encore par une fausse note, en ajoutant que Hartley attribua, en même temps que ses découvertes, le bleu du ciel à l'ozone, erreur qui fut propagée pendant des dizaines d'années alors que Strutt (Lord Rayleigh) avait déjà présenté en 1871 sa théorie de la diffusion moléculaire qui devait l'expliquer parfaitement. On voit donc qu'une majorité ne peut décider de l'essence d'une théorie scientifique et qu'ainsi les véritables questions scientifiques ne relèvent pas de la loi du nombre.

Après cette période historique remontant à la découverte de l'ozone et à son identification au laboratoire avec sa détection chimique et physique dans l'atmosphère, il a fallu attendre la fin de la première guerre mondiale pour voir se développer une période que l'on peut qualifier de celle des pionniers de la recherche sur l'ozone

atmosphérique. Ceux-ci ne pouvaient se rendre compte que leurs recherches allaient aboutir aujourd'hui, à poser des questions cruciales dans le domaine ressortissant à l'industrie aéronautique avancée ou à l'industrie des bombes-vaporisateurs. Néanmoins, en spécialistes de la physique de l'atmosphère, ils étaient guidés par des idées avancées qui les poussaient vers la compréhension de phénomènes atmosphériques liés aux conditions de vie de chaque jour. Je les ai tous connus et je peux vous assurer qu'ils ont travaillé, presque toujours dans un monde indifférent, mais toutefois sans hostilité dirigée, en développant systématiquement leurs recherches fondamentales, car ils avaient conscience qu'ils étaient les maîtres d'un premier ouvrage dans le cadre de l'environnement terrestre. Aucun d'entre eux n'ignorait les valeurs du passé dont ils avaient lucidement conservé le meilleur afin de préparer l'avenir à son plus haut degré.

Après que Fabry et Buisson eurent effectué à Marseille, en 1920, leurs premières observations spectroscopiques *quantitatives* du contenu en ozone de l'atmosphère en indiquant que la valeur moyenne n'était que de 0,3 cm (par rapport à l'épaisseur atmosphérique de l'ordre de 8 km lorsque réduite à la pression au sol) avec des variations d'un jour à l'autre, Dobson se lançait par l'utilisation d'un instrument adéquat dans des observations quotidiennes, d'abord à Oxford et, ensuite, à des stations réparties en divers endroits du Globe terrestre en même temps que Chapman, à Londres, posait les fondements de la théorie photochimique de l'ozone atmosphérique.

La première Conférence internationale sur l'ozone atmosphérique se réunissait, de facto, à Paris en mai 1929 à l'invitation de Charles Fabry. C'est là que Sydney Chapman présenta publiquement sa théorie de la formation (figure 1) de l'ozone ( $O_3$ ) résultant de l'association de la molécule d'oxygène ( $O_2$ ) soumise à la photodissociation par le rayonnement ultraviolet solaire avec l'atome d'oxygène (O) résultant de cette photodissociation. Dobson pouvait annoncer qu'aux variations journalières de l'ozone atmosphérique liées aux situations météorologiques (maxima dans les zones de basse pression figure 2a, minima dans les zones de haute pression figure 2b) se superposaient des variations en fonction de la saison et en fonction de la latitude (figure 3). Ces dernières se caractérisaient par de faibles valeurs d'ozone dans les régions équatoriales et par des valeurs élevées vers les hautes latitudes alors que la théorie photochimique semblait indiquer des conditions opposées puisque les effets du rayonnement solaire devaient être plus importants à l'équateur qu'au pôle. Quant aux variations saisonnières, elles étaient tout à fait inattendues, car elles se manifestaient par un maximum d'ozone à la fin

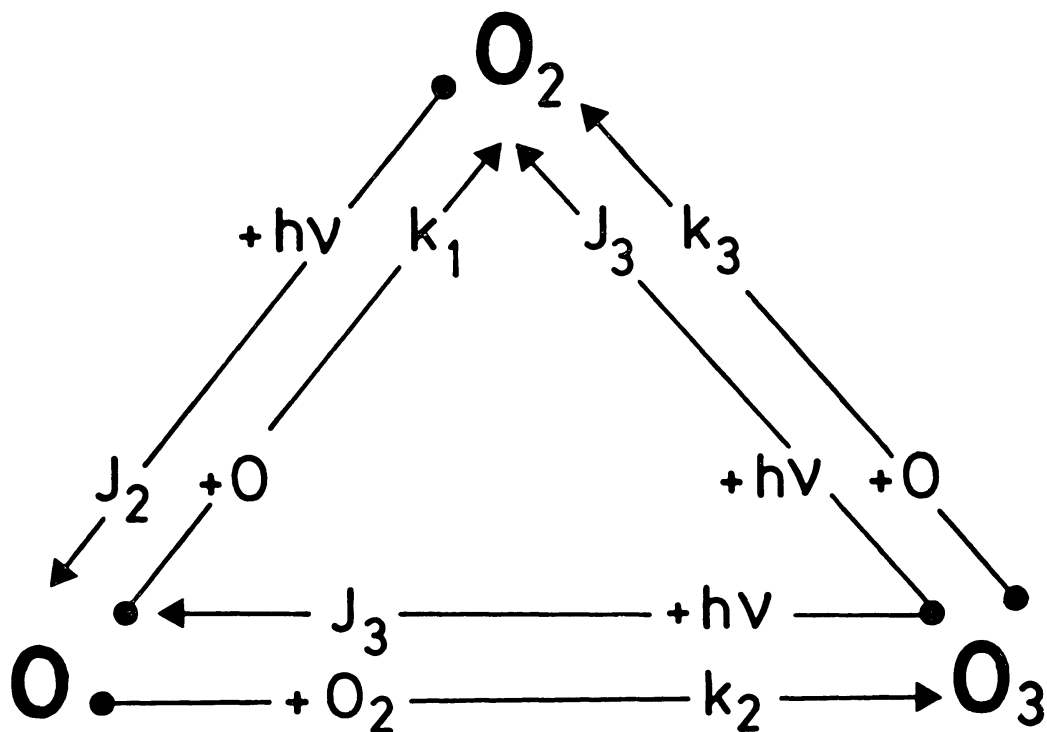


Fig. 1. — Schéma des réactions introduites par Chapman (1930) pour la formation aéronomique de l'ozone.  $J_2$  et  $J_3$  coefficients de photodissociation respectivement de  $O_2$  et de  $O_3$ ;  $k_1$  reformation de l'oxygène moléculaire,  $k_2$  et  $k_3$  respectivement formation et destruction de l'ozone.

de l'hiver et au début du printemps et par un minimum après l'été, en automne. Dans un même ordre d'idées mais marquant la stabilité, les observations de Chalonge et de Götz (1929) indiquaient qu'il n'y avait pas de différence dans les quantités totales d'ozone mesurées pendant le jour en utilisant la lumière solaire et pendant la nuit en visant la Lune. Toutefois, il est bon de rappeler qu'à cette conférence de Paris manquait un élément essentiel du puzzle de l'ozone atmosphérique, à savoir que l'altitude de la couche était alors fixée encore beaucoup trop haut, vers 50 km. Il fut donné à Götz du Lichtklimatisches Observatorium d'Arosa de découvrir, lors d'une expédition au Spitzberg, un effet spécial apparaissant lors de l'observation de l'ultraviolet solaire, l'effet Umkehr ou effet Götz. L'étude détaillée et systématique de cet effet caractérisant le rayonnement du ciel bleu atteignant le sol permit à l'équipe Götz, Meetham et Dobson de publier (figure 4) en 1934, les résultats de la méthode Umkehr fournissant non seulement la distribution verticale de l'ozone avec son maximum dans la stratosphère vers 25 km, mais démontrant au surplus que les principaux changements associés à la variation de la quantité d'ozone se manifestaient dans la stratosphère inférieure au-dessous de 20 km.

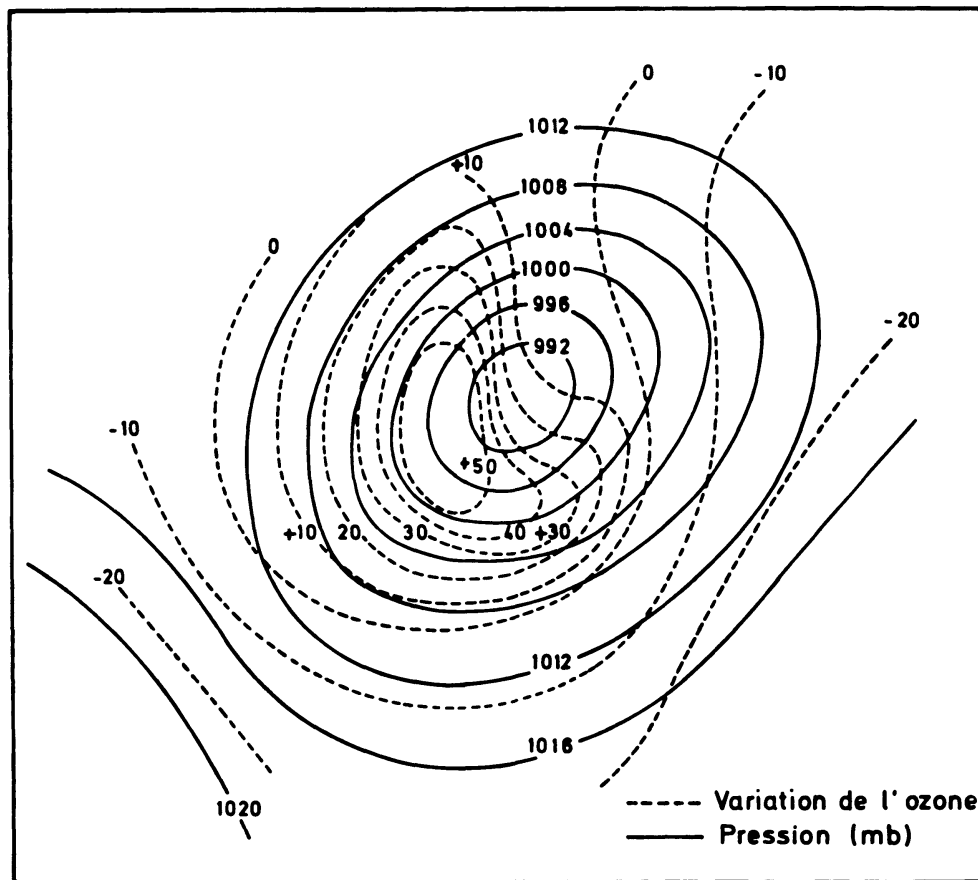


Fig. 2a. — Distribution typique de l'accroissement de la quantité totale d'ozone dans une zone de basse pression (situation cyclonique) telle qu'elle fut présentée avant 1930 par Dobson et coll. (1929). L'unité de variation de la quantité d'ozone est exprimée en 0,001 cm d'ozone pur à pression et température standards (1013 mb et 273 K).

Ainsi, on commençait à comprendre l'étroite association apparaissant souvent entre les variations de la quantité totale d'ozone et celles liées aux conditions atmosphériques caractérisées par des hautes et des basses pressions. La méthode de l'effet Götz a été utilisée pendant plus de 40 ans alors que se développaient les méthodes d'observation *in situ* par ozono-sondes tant en Europe qu'aux Etats-Unis et qu'aujourd'hui les Etats-Unis commencent à appliquer l'observation par satellite. C'est ainsi que furent jetées, par quelques scientifiques européens en une quinzaine d'années, les bases définitives et fondamentales d'un problème de l'environnement terrestre que les scientifiques américains avec toutes leurs possibilités se chargent de reprendre aujourd'hui.

Au fur et à mesure que se sont développées les observations de la distribution verticale de l'ozone, de nouvelles questions ont été



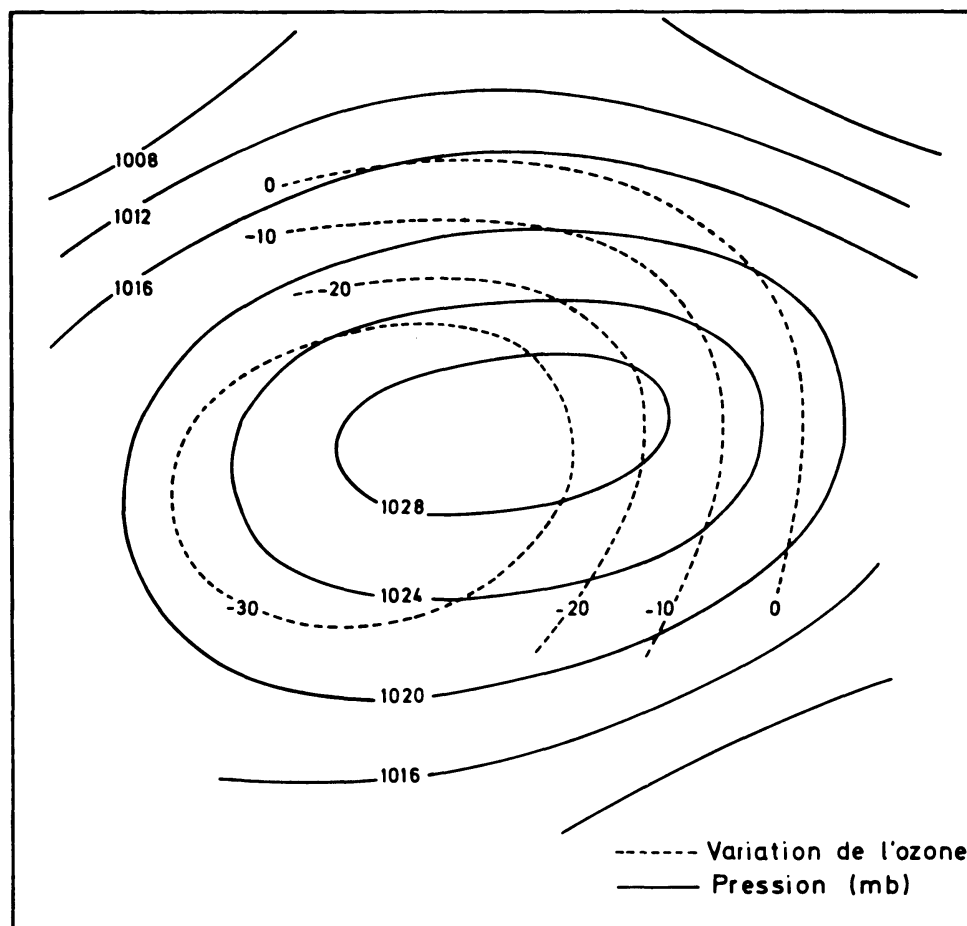


Fig. 2b. — Distribution typique de la diminution de la quantité totale d'ozone dans une zone de haute pression (situation anticyclonique). Même conditions que pour figure 2a.

soulevées. Bates et Nicolet, en 1950, furent les premiers à considérer que la théorie simple que l'on appliquait à l'ozone formé dans l'oxygène pur devait être développée en tenant compte des impératifs de l'aéronomie. Dans leur étude de la mésosphère, au-dessus de 50 km, ils démontrèrent ainsi que les produits de la dissociation de la vapeur d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) et du méthane ( $\text{CH}_4$ ), qui sont représentés à la fois par l'atome d'hydrogène (H) et par le radical hydroxyle (OH) avec le radical perhydroxyle ( $\text{HO}_2$ ), pouvaient attaquer catalytiquement l'ozone et l'atome d'oxygène et réduire ainsi la concentration d'ozone par rapport à celle pouvant exister dans une atmosphère d'oxygène pur.

Sous une forme simple, les processus essentiels introduits par Bates et Nicolet sont les suivants.

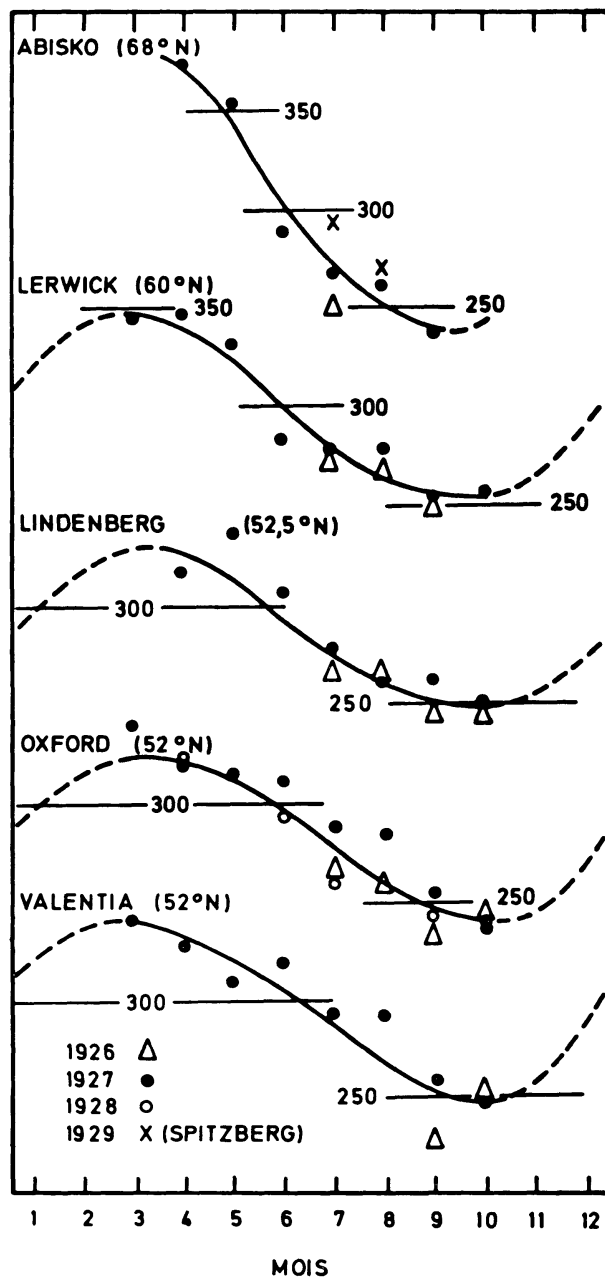


Fig. 3. — Variation saisonnière de la quantité totale d'ozone telle qu'elle fut détectée avant 1930 par Dobson et coll. (1930) de 52°N à 68°N indiquant une amplification vers les hautes latitudes. Les valeurs absolues 250, 300, 350  $\times 10^{-3}$  cm représentent les calibrations spectrales de l'époque.

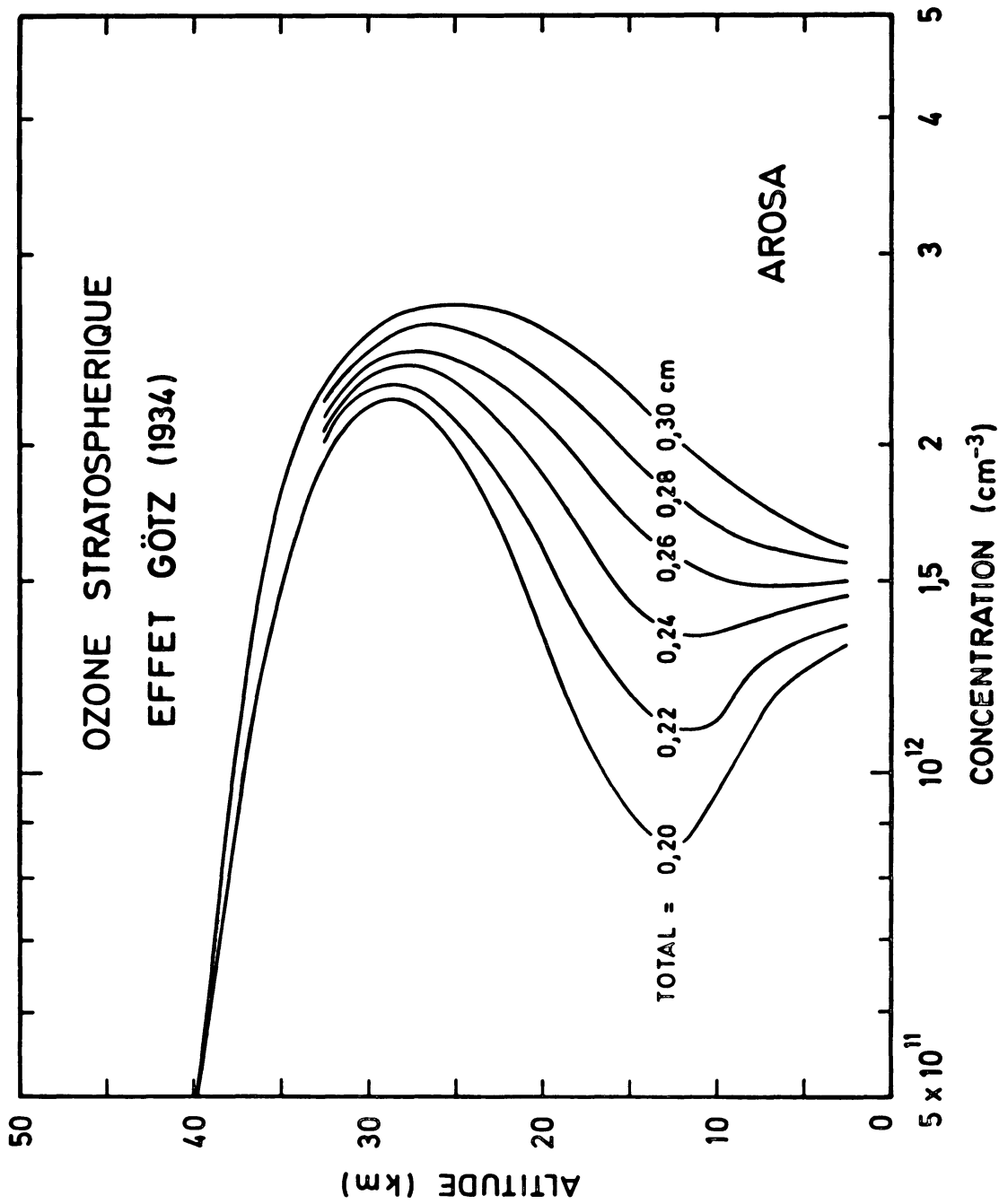
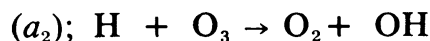


Fig. 4. — Première détermination de la distribution verticale de l'ozone atmosphérique par la méthode Umkehr par Götz, Meetham et Dobson (1934) où on note la variation prononcée au-dessous du maximum de concentration.

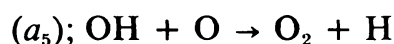
L'atome d'hydrogène (H) peut soit s'attacher à une molécule d'oxygène ( $O_2$ ) par une triple collision (+ M)



et constituer ainsi un radical perhydroxyle ( $HO_2$ ) ou soit réagir avec l'ozone



formant à nouveau la molécule  $O_2$  avec la constitution d'un radical hydroxyle (OH). Ce dernier peut, entre autres choses, réagir avec un atome d'oxygène (O) permettant de recommencer l'action ( $a_1$ ) ou ( $a_2$ ),

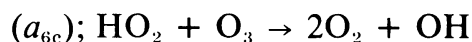
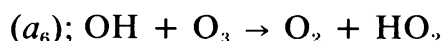


reconstituant en même temps la molécule d'oxygène. Un processus analogue avec le perhydroxyle est également possible



On voit donc que les réactions ( $a_2$ ) et ( $a_5$ ) constituent un cycle catalytique conduisant à la reconstitution de l'oxygène moléculaire et à la destruction simultanée de l'ozone dans la mésosphère au-dessus de 60 km. Au niveau de la stratopause (50 km), l'action catalytique des deux réactions ( $a_5$ ) et ( $a_7$ ) avec l'aide de ( $a_1$ ) détermine la concentration d'ozone en la réduisant à plus de la moitié de celle qu'elle pourrait être dans une atmosphère d'oxygène pur et parfaitement sec.

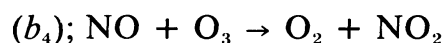
Enfin, il faut ajouter le doublet catalytique



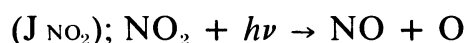
qui intervient dans les conditions aéronomiques de la stratosphère moyenne et inférieure. Cette analyse fut à la base de l'interprétation de l'émission infrarouge du ciel nocturne par Bates et Nicolet qui l'attribuèrent à une réaction lumineuse entre l'ozone et l'atome d'hydrogène produisant le radical OH dans des états excités. Cette théorie de l'aéronomie de la mésosphère fut extrapolée par de nombreux auteurs pendant quelque vingt ans, à la stratosphère en vue d'expliquer le comportement de tout l'ozone stratosphérique. Cependant, les observations de la distribution verticale de l'ozone dans

la stratosphère moyenne, effectuées en particulier au cours de l'Année Géophysique Internationale (1957-8) et l'obtention au laboratoire de nouvelles constantes de réaction de l'oxygène moléculaire et atomique avec l'ozone exigeaient de nouvelles recherches. Néanmoins, James McDonald affirmait encore le 2 mars 1971 devant une Commission du Sénat des Etats-Unis que la vapeur d'eau que pouvaient introduire les avions supersoniques volant dans la stratosphère serait une des causes de destruction de l'ozone par l'intermédiaire des radicaux hydroxyles et perhydroxyles. C'est alors qu'on parla pour la première fois avec emphase de la propagation du cancer de la peau par suite de la diminution de la quantité d'ozone dans la stratosphère résultant d'une pollution artificielle.

A ce moment (1970) Crutzen avait déjà proposé une action catalytique des oxydes d'azote sur l'équilibre de l'ozone dans la stratosphère. Il s'agit essentiellement des réactions suivantes : d'abord la réaction du monoxyde d'azote (NO) avec l'ozone



conduisant donc à la formation du dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) qui est soumis à la photodissociation avec un certain coefficient  $J_{\text{NO}_2}$  rapide, exigeant seulement quelques centaines de secondes,



et qui peut réagir en même temps avec l'atome d'oxygène



On voit donc que les réactions ( $b_3$ ) et ( $b_4$ ) tempérées par  $J_{\text{NO}_2}$  constituent un cycle catalytique conduisant à la reformation de  $\text{O}_2$  et ainsi à la destruction de l'ozone. On devait donc voir le problème de l'ozone stratosphérique dans le cadre d'une action destructrice des oxydes d'azote. Il restait, cependant, à envisager la possibilité d'un processus pouvant intervenir dans un sens opposé, que j'ai moi-même considéré dès le départ, c'est-à-dire



donnant lieu, par la présence simultanée d'oxydes d'azote et d'hydrogène, à la formation d'acide nitrique qui s'écoule dans la troposphère où il disparaît par suite de sa solubilité. Ainsi l'acide

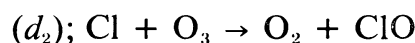
nitrique, et peut-être d'autres acides non identifiés, sont à la base du rejet stratosphérique des oxydes d'azote dont le mécanisme atmosphérique n'est pas encore totalement compris.

En fait, ce fut seulement lorsque Harold Johnston (1971) associa cette action des oxydes d'azote à l'effet d'une pollution artificielle par des avions supersoniques volant dans la stratosphère que le problème prit une ampleur considérable et entra dans le domaine public (journal quotidien, radio et télévision) tant par les actions entreprises au niveau de la Chambre et du Sénat américains que du programme scientifique (CIAP) développé pendant quatre ans sous l'égide du Département des Transports des Etats-Unis et du Comité sur les Effets Météorologiques des Avions Stratosphériques (COMESA) sous la direction du Dr. Murgatroyd en Angleterre et du Comité d'Etudes des Conséquences des Vols Stratosphériques (COVOS) sous la direction du professeur G. Brun en France. Cependant, il faut reconnaître que c'est aux Etats-Unis que le problème a pris à la fois un caractère officiel et une base scientifique très développés (DOT-CIAP Final Report : The Effects of Stratospheric Pollution by Aircraft by Alan J. Grobecker, S.C. Coroniti and R.H. Cannon Jr., DOT-TST-75-50, December 1974 + 6 Monographies (1975); National Academy of Sciences : Environmental Impact of Stratospheric Flight-Biological and Climatic Effects of Aircraft Emissions in the Stratosphere, 1975) qui débordent dans le cadre international suivant des normes américaines. En Europe, c'est jusqu'à présent par le quotidien ou l'hebdomadaire que les conclusions des scientifiques sont présentées soit comme l'expression d'un désaccord complet relevant d'hypothèses violemment contestées, soit comme l'indication très claire que les quelques « Concorde » prévus ne peuvent avoir aucun effet appréciable, mais qu'une flotte d'avions supersoniques stratosphériques atteignant le millier serait catastrophique. Néanmoins, un aspect des rapports américains ne franchit pas l'Atlantique dans la masse des nouvelles du jour, à savoir celui précisant que des recherches scientifiques sur la stratosphère sont requises en toute priorité à l'échelle planétaire tant dans les domaines théoriques qu'expérimentaux et observationnels.

Le problème des oxydes d'azote a failli brusquement s'estomper en 1974 lorsque Rowland et Molina ont annoncé que l'atome de chlore issu des composés (chlorofluorométhanes) introduits dans les vaporisateurs et les réfrigérateurs contemporains, pouvait apparaître dans la stratosphère sous l'effet de la photodissociation par le rayonnement ultraviolet solaire subsistant à ces altitudes. Ainsi, comme dans le cas des oxydes d'hydrogène et d'azote, l'atome de chlore et son

oxyde peuvent par leur réactions catalytiques avec l'ozone et l'atome d'oxygène, conduire à partir d'une certaine concentration à une diminution du contenu stratosphérique d'ozone. Il convenait donc de déterminer, à partir de la production industrielle bien connue des « fréons » et de leurs associés, les conséquences éventuelles du développement de cette production en vue de fixer les effets quantitatifs futurs sur la couche d'ozone. Comme la « stratégie scientifique » avait été mise en place aux Etats-Unis pour l'étude de la pollution stratosphérique par les avions supersoniques, il n'a fallu qu'un instant à certains groupes de scientifiques américains pour apporter, dans certains cas, des réponses péremptoires que l'industrie abasourdie a ensuite pu contester dans leur caractère absolu. Cas de conscience ou d'inconscience scientifique requis pour attirer l'attention de responsables politiques que l'on peut assimiler à un moyen qui est devenu un mode d'action dans le concept actuel dans lequel évolue la science. En tout cas, la méthode a porté ses fruits si l'on en juge par la multitude d'« agences stratosphériques » dans le cadre national américain et même dans le cadre international. Ainsi, ce lancement des problèmes stratosphériques fournit-il à certaine presse l'occasion d'exposer avec bonheur le problème des bombes-vaporisateurs. Cependant, il n'en demeure pas moins que subsistent des problèmes scientifiques que la NASA (National Aeronautic and Space Administration) a mis à son programme de recherches avec ses énormes moyens. Sans doute, cela est-il suffisant pour que l'autre partie du monde se confine globalement dans un environnement aboulique.

Néanmoins, il faut rappeler ici que le problème du chlore stratosphérique déjà soulevé par Stolarski et Cicerone en 1973, n'avait suscité que peu d'enthousiasme car il semblait que l'effet sur l'ozone ne pouvait apparaître par suite d'une production naturelle insuffisante attribuée en particulier aux émanations volcaniques. Le mécanisme envisagé (figure 5) était déjà celui qu'on accepte aujourd'hui : l'atome du chlore (Cl) attaque l'ozone dans une réaction rapide



où se retrouve l'oxygène moléculaire et où apparaît le monoxyde de chlore (ClO) qui peut réagir rapidement avec l'atome d'oxygène



donnant lieu ainsi à la reconstitution de la molécule d'oxygène et à nouveau au chlore atomique. Ce cycle catalytique ( $d_2$ ) et ( $d_3$ ) est très

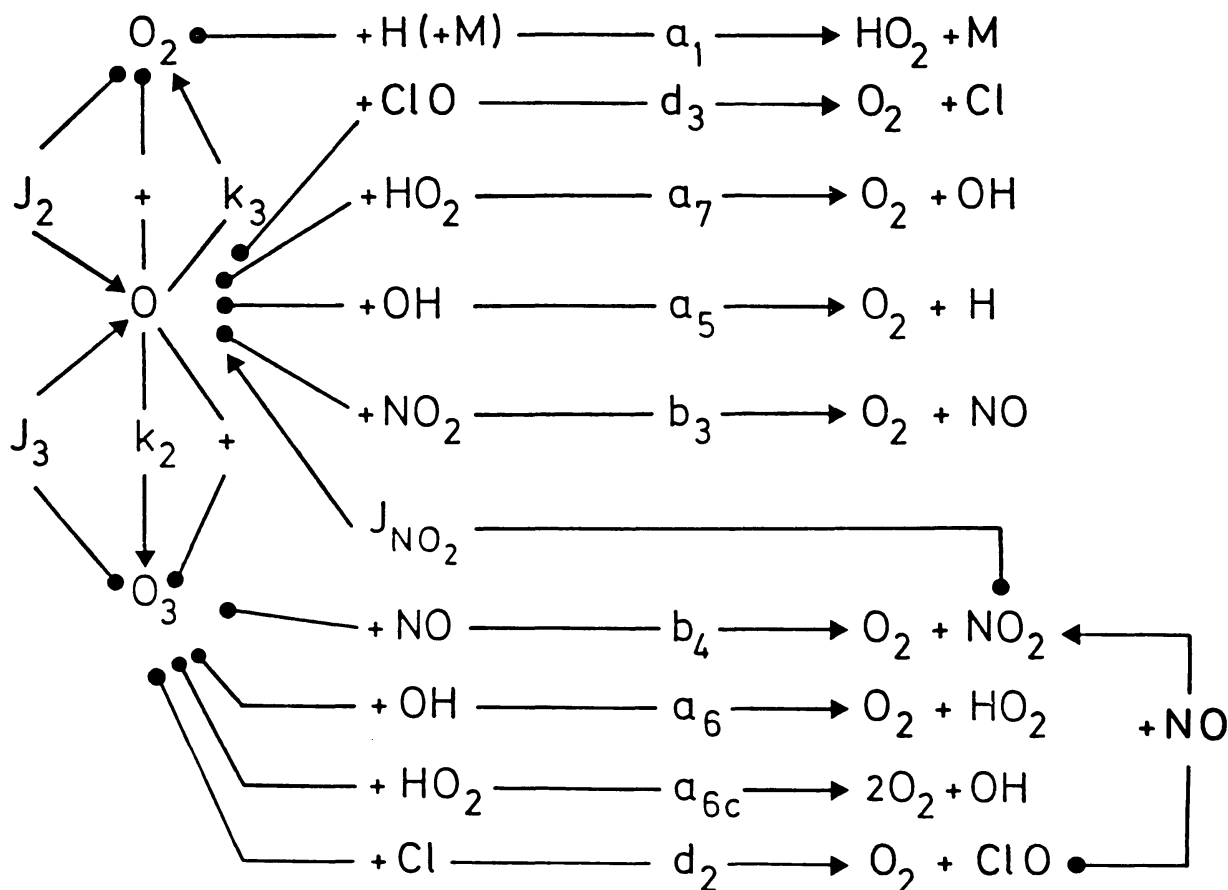


Fig. 5. — Schéma des réactions catalytiques dans lesquelles sont impliqués le chlore, l'azote et l'hydrogène (atomes et molécules) et qui peuvent intervenir directement dans l'équilibre chimique de l'ozone stratosphérique.

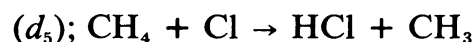
actif dans la destruction de l'ozone. Cependant, dans l'atmosphère et en particulier dans la stratosphère inférieure où il est observé, le monoxyde d'azote (NO) réagit également avec le monoxyde de chlore (ClO)



en donnant naissance au dioxyde d'azote ( $NO_2$ ) qui, soumis à la photodissociation rapide par le rayonnement solaire, restitue un atome d'oxygène se transformant immédiatement en ozone. Le processus ( $d_4$ ) est donc important dans les conditions aéronomiques, car il réduit l'action de la réaction ( $d_3$ ) et ainsi celle du cycle catalytique ( $d_2$ ) et ( $d_3$ ) d'au moins 50%.



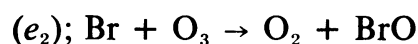
Quant à l'élimination du chlore de la stratosphère, elle doit se faire, par exemple, par l'intermédiaire de l'acide chlorhydrique (HCl) qui est « soluble » dans la troposphère. La formation de HCl est due à une réaction où intervient, par exemple, le méthane (CH<sub>4</sub>)



qui est cependant contrariée par une réaction telle que



Ces processus aéronomiques peuvent s'appliquer mutatis mutandis aux autres halogènes (figure 6). Dans le cas du brome, on peut également écrire un cycle catalytique analogue à celui du chlore

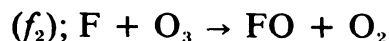


tempéré par la réaction



Cependant, une différence apparaît, car la formation de l'acide bromhydrique (HBr) à partir d'une réaction avec le méthane (CH<sub>4</sub>) ou l'hydrogène moléculaire (H<sub>2</sub>) est une réaction endothermique ne pouvant jouer un rôle en aéronomie stratosphérique, car les températures sont trop basses. A première vue, l'accumulation du brome dans la stratosphère pourrait avoir lieu bien que sa production naturelle marine soit très faible. Il est vrai que l'effet de sa production industrielle sous forme de bromure de méthyle (CH<sub>3</sub> Br) a été soulevée par McElroy et ses collaborateurs en 1975. Il faut en effet considérer que le bromure de méthyle, tout comme d'autres dérivés halogénés, est utilisé en agriculture comme désinfectant du sol. Je ne reviendrai plus ici sur ce problème du brome bien qu'il soulève d'intéressantes questions dans plusieurs domaines scientifiques. Des études plus développées tant théoriques qu'expérimentales sont nécessaires pour lever les trop grandes incertitudes.

Dans le cas du fluor, on écrira également le cycle catalytique initial



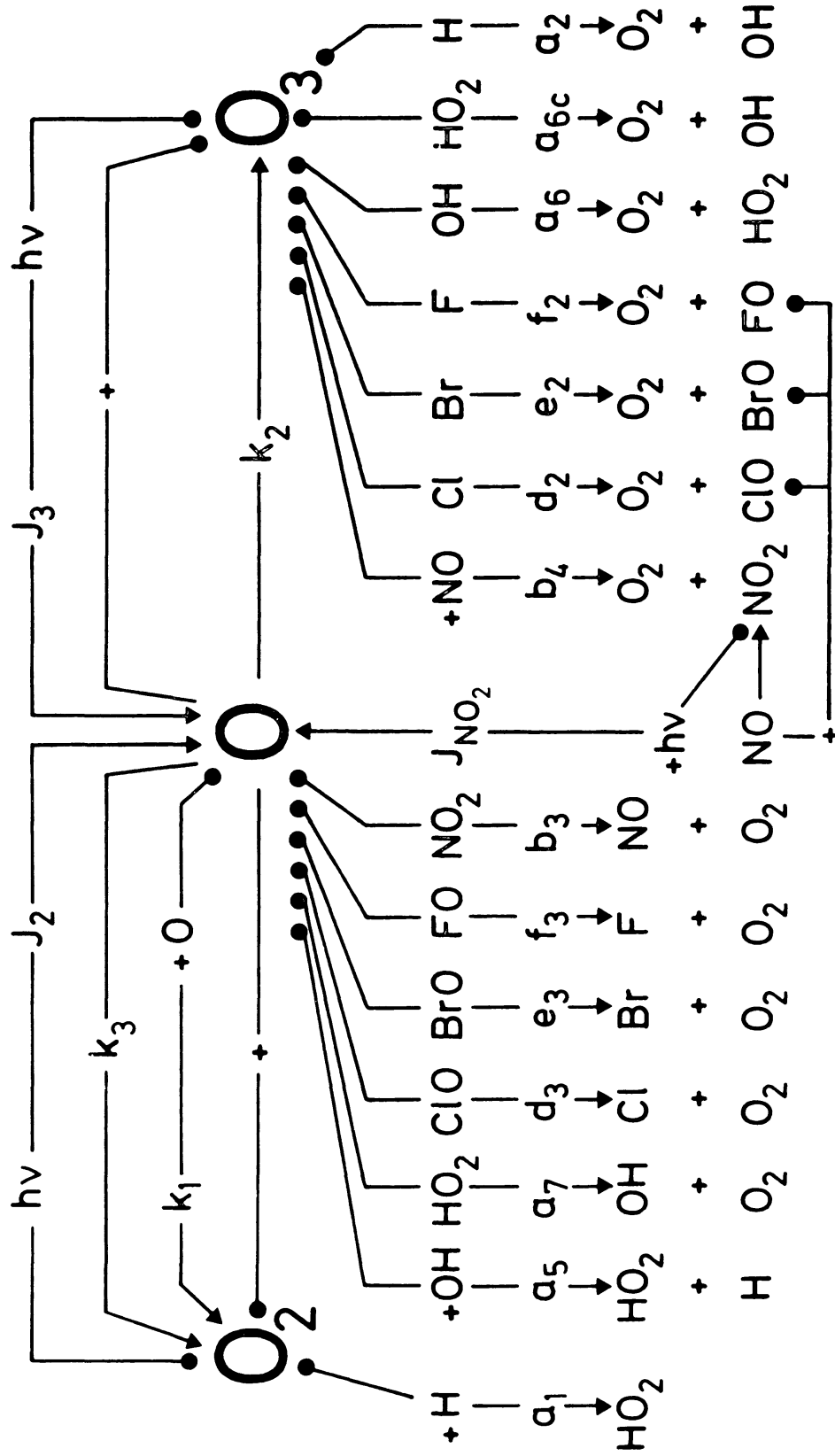
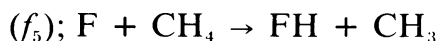


Fig. 6. — Ensemble des réactions intervenant dans la stratosphère et conduisant à la destruction de l'ozone.

tempéré par la réaction avec le monoxyde d'azote



L'action d'élimination du fluor par l'acide fluorhydrique (HF) semble pouvoir être importante, car tout d'abord



est une réaction rapide alors que la réaction d'opposition



étant fortement endothermique n'a pas lieu dans la stratosphère. Il semblerait, suivant les premières vues de Stolarski (1975) que l'élimination du fluor de la stratosphère s'effectuerait par la transition de l'acide fluorhydrique arrivant dans la troposphère. En tout cas, il convient d'attendre le développement de recherches aéronomiques plus approfondies pour obtenir une évaluation détaillée du comportement du fluor dont je ne peux ici poursuivre l'analyse.

\* \* \*

Quelles que soient les attitudes adoptées envers la recherche, différentes de-ci de-là, les mêmes questions se posent aujourd'hui à tout endroit de la planète, c'est-à-dire des questions auxquelles on ne peut que s'efforcer de répondre avec la conscience du doute scientifique.

Tout d'abord, il faut rappeler que la pollution de la stratosphère par les constituants minoritaires se présente différemment suivant leur composition chimique, non pas uniquement par le caractère propre de leurs réactions, mais aussi par la diversité de leurs origines. Ainsi, l'origine de la pollution peut être uniquement artificielle pour certains constituants, tandis que, dans d'autres cas, l'effet artificiel s'ajoute à une action naturelle. S'il s'agit de l'action des constituants hydrogénés, la vapeur d'eau et le méthane naturels jouent un rôle déterminant. Il en est de même des oxydes d'azote dont l'origine physique ou biologique les conduit à jouer un rôle essentiel sur le contenu stratosphérique de l'ozone. Il semble que dans le cas des halogènes, en particulier le chlore, l'action naturelle du chlorure de méthyle ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ ) et peut-être aussi celle du tétrachlorure de carbone

( $\text{CCl}_4$ ) doivent être introduites avant l'action des produits industriels (hydrocarbures chlorés) qui s'amplifie chaque année avec l'accroissement de la production. C'est pourquoi une analyse de l'importance des diverses sources et de leur destruction s'impose.

Dans le cas des composés hydrogénés, on doit d'abord savoir comment la vapeur d'eau pénètre dans la stratosphère et peut rentrer dans la troposphère. S'il apparaît que c'est dans les régions tropicales, par l'intermédiaire de la cellule de Hadley, que l'air troposphérique fait un circuit dans la stratosphère, il faut en conclure que quelques millièmes d'un contenu en vapeur d'eau à la tropopause conduisent à une intrusion stratosphérique de l'ordre du million de tonnes de vapeur d'eau par jour. Quel est le circuit exact de cette vapeur d'eau ? Tout le retour vers la troposphère est-il assuré au sein de la cellule de Hadley ou existe-t-il un puits d'hiver dans l'Antarctique où les températures au niveau de la tropopause peuvent atteindre jusqu'à  $-80$  °C ? Dans un tel cas, n'existerait-il pas une variation avec la latitude de la concentration stratosphérique de la vapeur d'eau ? Comme il apparaît, au seul endroit (Washington, D.C.) où des mesures stratosphériques sont effectuées depuis dix ans, que le contenu en vapeur d'eau, avec sa variation annuelle, aurait augmenté d'une façon continue de presque cinquante pour cent, faut-il penser à une variation à longue période du climat ou à une fluctuation de quelques années ? En tout cas, aucune explication ne peut être donnée à l'heure actuelle. Enfin, que faut-il penser d'observations récentes tendant à montrer qu'au-dessus de 35 km sa concentration relative augmente avec l'altitude de telle sorte que cette concentration relative doublerait lorsqu'on passe de la stratosphère inférieure à la stratosphère supérieure.

On voit donc qu'il ne s'agit plus de dire aujourd'hui que la stratosphère est une atmosphère desséchée où la concentration relative en vapeur d'eau n'est que de quelques millièmes, mais qu'il importe de connaître exactement son contenu et son évolution dont dépend l'ozone stratosphérique à la stratopause (50 km) et au-delà. Il faut, bien entendu, introduire l'effet du méthane ( $\text{CH}_4$ ) qui peut être oxydé par le radical hydroxyle (OH). Ainsi, une molécule de méthane finit par se transformer en une molécule de monoxyde de carbone (CO) et deux molécules de vapeur d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Cette destruction continue du méthane alimentant la stratosphère en vapeur d'eau doit être compensée par un flux continu devant venir de son lieu de production qui est le sol. En effet, ce « gaz des marais » est bien le résultat de la putréfaction dans les marécages fournissant quelque cent à deux cents millions de tonnes par an, tout comme d'ailleurs les

champs de riz qui apporteraient même une contribution supérieure pouvant atteindre 300 millions de tonnes. A cet ensemble, doit s'ajouter la fermentation entérique des animaux, et en particulier des ruminants, conduisant à une production du même ordre de grandeur que le gaz des marais. Ainsi, la production biogénique du méthane, qui s'élève à plus de 500 millions de tonnes par an, est nettement supérieure à celle résultant de sources minérales. Ce sont donc des bactéries anaérobies, apparaissant dans divers milieux caractérisés par l'anoxie en présence de matières organiques, qui peuvent conduire à une intrusion dans la stratosphère de quelque cent millions de tonnes de vapeur d'eau par an par l'intermédiaire du méthane. On voit donc qu'il existe une pollution naturelle en vapeur d'eau de la stratosphère due à la vie animale et si l'on veut déterminer l'effet éventuel de l'introduction artificielle de vapeur d'eau, par exemple, par une flotte d'avions supersoniques, on voit immédiatement que son action ne peut être principale. Néanmoins, le problème de la distribution et de la concentration des composés hydrogénés dans la stratosphère (vapeur d'eau, méthane et hydrogène moléculaire) devrait requérir l'attention dans une analyse objective de l'évolution des conditions aéronomiques. Nous verrons plus loin que leurs produits interviennent dans des réactions avec les oxydes d'azote et également avec les composés halogénés. En outre, les sources biogéniques du méthane devraient être l'objet d'analyses plus développées visant des déterminations théoriques et expérimentales plus précises des taux de production dans les diverses circonstances et en de multiples lieux. S'il apparaît, en effet, que la durée de vie du méthane dans l'atmosphère (troposphère) est assez courte (de l'ordre d'un à trois ans) en raison de son oxydation par le radical hydroxyle, il conviendrait de connaître cette action avec plus de précision en vue de comprendre définitivement l'ensemble des mécanismes stratosphériques auxquels sont soumis les produits successifs de la dissociation du méthane.

Dans le cas des oxydes d'azote auxquels on a attaché une importance exceptionnelle au cours des cinq dernières années, on a considéré une série de sources naturelles et une série de sources artificielles. Jusqu'à présent, la seule source artificielle retenue comme ayant pu avoir un effet est celle résultant de l'explosion de bombes nucléaires dans la stratosphère. Les essais thermonucléaires effectués il y a quelque quinze-vingt ans par les Etats-Unis et l'Union Soviétique ont été à l'origine de cette hypothèse. Lorsqu'une bombe explose dans la stratosphère, elle peut provoquer la rupture des molécules d'azote tant que les températures ambiantes restent supérieures à 2000 K. Ces atomes d'azote réagissent immédiatement avec

les molécules d'oxygène en formant les oxydes d'azote qui peuvent alors attaquer catalytiquement l'ozone. Bien que l'on ait considéré qu'une bombe nucléaire d'une mégatonne pouvait conduire à la formation de  $10^{32}$  molécules de monoxyde d'azote (NO) et qu'on ait estimé que le total d'explosions nucléaires de 1952 à 1962 ait atteint quelque 500 mégatonnes, les résultats publiés d'analyses des observations de l'ozone atmosphérique laissent perplexes : si, pour certains auteurs, l'effet destructif sur l'ozone est évident, pour d'autres l'interprétation des données d'observation de l'ozone atmosphérique est différente. A l'heure actuelle, on pourrait presque dire qu'une part sentimentale intervient dans l'analyse. En tout cas, il faut admettre que l'effet que l'on aurait dû voir apparaître dans la foulée de la prévision des zéloteurs ne se manifeste pas clairement. Peut-être la stratosphère, par un réflexe météorologique (vapeur d'eau) ou aéronomique (acide nitrique) non encore défini, estompe-t-elle la réalité des faits à moins qu'il n'y ait une erreur introduite par l'un ou l'autre postulat. Il ne faut cependant pas préjuger de l'effet d'actions plus prononcées en s'imaginant qu'une guerre thermonucléaire avec plus de 1000 mégatonnes n'affecterait pas la couche d'ozone. On pourrait ajouter, dans le même ordre d'idées, qu'il subsiste également un doute dans le cas des événements solaires (éruption solaire) correspondant à une forte émission de protons pénétrant dans l'atmosphère terrestre aux hautes latitudes jusque dans la stratosphère. Il semble que la production des oxydes d'azote ne se manifeste pas par une diminution de l'ozone observé à diverses stations comme pourrait le faire penser une théorie simpliste. Le calcul est-il erroné ou la pénétration est-elle suffisamment stratosphérique ou la photodissociation du monoxyde d'azote est-elle un élément important ? Nul ne peut le prouver.

En tout cas, l'incertitude d'un effet artificiel dû aux bombes thermonucléaires n'empêche pas de considérer que les essais dans l'atmosphère auraient pu conduire pendant dix ans à une production de l'ordre de 10 millions de molécules de monoxyde d'azote  $[(10 \pm 5) \times 10^6]$  par  $\text{cm}^2$  et par seconde. Une telle production est du même ordre de grandeur que la source naturelle due aux rayons cosmiques. En effet, les particules (protons) du rayonnement cosmique galactique atteignant la stratosphère inférieure provoquent en même temps qu'une ionisation maximum une dissociation de l'azote conduisant à la formation du monoxyde d'azote dont la production peut atteindre jusqu'à 50 millions de molécules par  $\text{cm}^2$  et par seconde dans les régions polaires et tomber à 5 millions dans les régions équatoriales. De telles valeurs de la production naturelle (rayons cosmiques) ou artificielle (bombes thermonucléaires) du monoxyde d'azote permet-

tent d'imaginer, en vue d'obtenir un équivalent, une flotte de 100 avions supersoniques « Concorde » volant dans la stratosphère dans des conditions déterminées (17 km) ou une flotte peut-être réduite à une ou deux dizaines d'avions supersoniques d'un type plus avancé qui voleraient au-dessus de 20 km. De telles évaluations ont déclenché en tout cas des polémiques à un certain niveau et suscité à d'autres niveaux des recherches sur les oxydes d'azote dans la stratosphère. Dans ce dernier cas, l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique s'est manifesté par son action dans le cadre d'observations à 40 km d'altitude.

Quoi qu'il en soit, on arrive à la conclusion que la présence des oxydes d'azote dans la stratosphère résulte non seulement d'une cause naturelle, mais est surtout d'origine biogénique. Lors du processus de dénitrification dans le sol, une partie de l'azote, qui s'échappe dans l'air, apparaît sous forme d'oxyde nitreux ( $N_2O$ ). Une certaine fraction de celui-ci passe dans la stratosphère où une action oxydante [atome d'oxygène excité  $O(^1D)$  produit par la photolyse de l'ozone à  $\lambda < 310$  nm] le transforme ( $N_2O + O$ ) en deux molécules de monoxyde d'azote ( $NO + NO$ ). Il existe une pollution naturelle de la stratosphère par les oxydes d'azote assimilable aujourd'hui à un équilibre naturel. En effet, la quantité d'ozone observée dans la stratosphère, qui est inférieure à celle qui résulterait d'une atmosphère d'oxygène contenant une très faible quantité (inférieure au cent-millième) de vapeur d'eau, est interprétée actuellement comme le résultat de l'action destructrice additionnelle des oxydes d'azote sur l'ozone.

Il est bien connu par les études du cycle de l'azote que l'azote de l'air après sa fixation (atmosphérique, biologique ou artificielle) est transformé, en fin de compte, en nitrates dont une partie donne lieu, par l'intermédiaire de bactéries dénitrifiantes, à des produits gazeux, l'azote moléculaire et l'oxyde nitreux, qui s'échappent alors du sol. Le problème posé aujourd'hui est cependant celui de la détermination de la production marine d'oxyde nitreux et le problème, qui pourrait se poser à longue échéance, est celui qui résulte de la fixation industrielle de l'azote de l'air augmentant d'une année à l'autre. On peut noter ici que les observations de l'eau de l'Océan Atlantique indiquent une supersaturation en oxyde nitreux ( $N_2O$ ) qui décroît systématiquement des latitudes tropicales vers les hautes latitudes. Faut-il attribuer l'origine de cet oxyde nitreux uniquement à un résultat de la dénitrification marine ? On peut presque certainement l'affirmer bien que les études marines ne l'indiquent pas aussi clairement que celles de la microbiologie du sol. En tout cas, si l'on accepte certaines déterminations récentes (Hahn, 1975), l'océan dans son ensemble fournirait à

l'atmosphère quelque cent millions de tonnes d'oxyde nitreux par an, alors que tous les sols réunis ne relâcheraient que quelque 25 millions de tonnes. Le dilemme, qui se pose aujourd'hui, comporte un choix entre une production élevée (océans et sols) que les processus aéronomiques (basés sur des données expérimentales élémentaires concernant la photodissociation de  $N_2O$ ) ne peuvent expliquer et une production restreinte (sols sans océan) que les données physiques pourraient expliquer. En d'autres termes, l'imprécision ou l'inconnu se traduit dans la durée de vie de cet oxyde azoteux biogénique qui va de l'extrême court de l'ordre de dix ans (forte production océanique et processus de destruction dans la stratosphère non encore identifié) à l'extrême long de presque cent ans (sans production océanique et processus de destruction dans l'atmosphère par photodissociation). Dans ce dernier cas, on pourrait alors se poser avec McElroy (1975) des questions à la suite de l'accroissement continu de la production industrielle de fixation de l'azote de l'air pour les besoins de fertilisation des sols.

Il y a 25 ans, la fixation industrielle d'azote à l'échelle mondiale s'élevait à une quantité comprise entre 3 et 4 millions de tonnes par an alors que seule la fixation par les décharges électriques (phénomènes d'ionisation et de dissociation lors des éclairs d'orage) s'élevait à quelque dix millions de tonnes. Aujourd'hui, la production industrielle est décuplée et atteint environ 40 millions de tonnes par an. On peut, paraît-il, prévoir qu'en l'an 2000, la fixation annuelle dépassera les 100 millions de tonnes et pourrait atteindre 200 millions de tonnes d'azote fertilisant. La comparaison de ces diverses valeurs de la fixation industrielle à celles de la quantité totale annuelle due aux processus biologiques dans les sols révèle des valeurs comparables. Le total s'élèverait à 180 millions de tonnes dont la moitié environ dans le sol agricole. En l'absence d'une production marine importante d'oxyde azoteux ( $N_2O$ ), il est donc clair que son cycle naturel résultant uniquement de l'émanation du sol pourrait être modifié dans le futur. En d'autres termes, si une telle hypothèse était valable, les oxydes d'azote augmenteraient dans la stratosphère et la couche d'ozone serait soumise à des modifications sérieuses après l'an 2000. On ne peut toutefois accepter une telle conclusion à moins que des preuves irréfutables ne soient apportées à partir d'observations définitives. Néanmoins, il faut attaquer ce problème dans le cadre de disciplines scientifiques différentes allant de l'océanographie à la pédologie, dans le cadre de la biosphère, tout en multipliant les observations de l'oxyde nitreux à diverses latitudes de la troposphère à la stratosphère en vue de déterminer éventuellement l'une ou l'autre variation, sinon des fluctuations à plus ou moins longue période.



Après cette analyse des conditions générales se rapportant essentiellement aux sources des composés de l'hydrogène et de l'azote qui interviennent dans l'équilibre de l'ozone stratosphérique, il convient de terminer par une incursion dans le domaine des hydrocarbures chlorés.

Jusqu'à présent, on ne s'est pas encore beaucoup attaché à la détermination de l'origine naturelle de composés tels que le tétrachlorure de carbone ( $\text{CCl}_4$ ) ou le chlorure de méthyle ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ ) dont la concentration relative dans l'air apparaît assez élevée, de l'ordre du milliardième ( $10^{-9}$ ), d'après des mesures récentes de Lovelock (1975). La source est-elle océanique ? Dans ce cas, son origine devrait résulter d'une action partant de l'iodure de méthyle ( $\text{CH}_3\text{I}$ ) produit par des algues marines et réagissant avec les ions de chlore dans l'eau de mer. Mais, peut-être sa source principale se trouve-t-elle dans les régions tropicales et dans ce cas devrait être le résultat d'une agriculture où le feu joue un rôle essentiel.

Je ne parlerai pas ici des insecticides organo-chlorés dont l'exemple le plus connu est le DDT [1, 1, 1, trichloro-2, 2bis (p-chlorophenyl) éthane] et ses dérivés-résidus. A certains endroits, on a observé, il y a dix ans, des concentrations relatives dans l'air atteignant le milliardième, qui auraient pu amener dans la stratosphère une certaine quantité de chlore, car certains hydrocarbures chlorés peuvent être photodissociés par l'ultraviolet solaire au-dessous de  $0,25 \mu\text{m}$  c'est-à-dire uniquement dans la stratosphère supérieure. Cependant, vu que le DDT n'a qu'une durée de vie limitée dans l'air (de l'ordre de quelques années au maximum) et que les précipitations jouent un rôle dans sa disparition de l'air, on peut admettre que de tels produits ne sont pas à considérer ici surtout si on tient compte du ralentissement considérable de sa production industrielle et des réglementations interdisant actuellement l'utilisation d'hydrocarbures chlorés en agriculture.

Parmi les productions industrielles les plus importantes de ces hydrocarbures chlorés, nous rencontrons d'abord celles du chlorure de vinyle ( $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$ ) et du dichloro-1,2 éthane ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$ ) respectivement de l'ordre de 10 et 20 millions de tonnes par an. Ces produits intermédiaires ne passeraient, paraît-il, qu'en très faible quantité dans l'atmosphère et ne devraient donc pas concerner notre problème. On retiendra, cependant, que le tétrachlorure de carbone ( $\text{CCl}_4$ ), qui peut résulter de la chlorolyse d'une gamme importante d'hydrocarbures chlorés, est également un produit intermédiaire dont la production industrielle actuelle est de l'ordre du million de tonnes par an. Il apparaît dans l'air dans une proportion du dix-milliardième explica-

ble partiellement peut-être par une origine naturelle encore mal définie. Il en est certainement de même d'autres produits intermédiaires tels que le chloroforme ( $\text{CHCl}_3$ ) et le chlorure du méthyle ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ ) dont la production industrielle annuelle n'est que de l'ordre de 300.000 tonnes.

Il faut donc retenir surtout les produits dont la dispersion dans l'environnement correspond pratiquement à leur production. Ce sont tout d'abord des solvants que l'on retrouve partout aujourd'hui en usage domestique et industriel et dont la récupération est toute relative. Dans le groupe « éthylène », la production annuelle dispersée dans l'environnement atteint actuellement un million de tonnes pour le trichloro-éthylène ( $\text{C}_2\text{HCl}_3$ ) et pour le perchloroéthylène ( $\text{C}_2\text{Cl}_4$ ). Ces deux produits se retrouvent respectivement dans le café décaféiné et dans le beurre, parfois en trop grande quantité. Le trichloro-éthylène, qui est un anesthésique, est utilisé comme solvant d'extraction pour le café décaféiné et se retrouve également dans le paquet de thé. Il en est de même du perchloro-éthylène qui, employé en particulier comme vermifuge en médecine vétérinaire à dose thérapeutique, peut dès lors se retrouver quelquefois dans le beurre. Pour mémoire, ajoutons que le tétrachlorure de carbone ( $\text{CCl}_4$ ) est d'un emploi courant comme désinfectant pour la conservation de céréales et que le chloroforme ( $\text{CHCl}_3$ ), anesthésique bien connu, peut également se retrouver dans un fromage aromatisé.

Quoi qu'il en soit, aujourd'hui la préoccupation essentielle résulte de la prolifération de l'utilisation des Fréons dans les vaporisateurs et les réfrigérateurs, un nom commercial des chlorofluorométhanes. En effet, qui ne connaît aujourd'hui le vaporisateur ou la bombe aérosol, assainisseur désodorisant l'atmosphère contaminée ou confinée, l'insecticide détruisant tout objet volant, la laque éjectée ou le détachant répandu, et même les mousses propulsées allant du savon pour le rasage de la barbe à la cire destinée au lustrage du parquet. Il s'agit du trichlorofluorométhane ( $\text{CFCl}_3$ , Fréon 11) et du dichlorodifluorométhane ( $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ , Fréon 12) dont la production annuelle totale dépasse aujourd'hui le million de tonnes alors qu'il y a une quinzaine d'années, elle n'atteignait que quelque 150.000 tonnes. Cet accroissement spectaculaire tant aux Etats-Unis qu'en Europe a créé le problème du jour. On peut dire que 60 % de cette production passe dans la vaporisation, 25 % dans les réfrigérateurs domestiques et commerciaux et le reste dans les mousses-aérosols. Comme les Fréons ont toutes les qualités physiques pour les usages courants, en particulier leur volatilité et leur faible solubilité dans l'eau, ils se répandent dans l'atmosphère où ils peuvent persister. Cette accumulation dans

la troposphère où le brassage s'effectue rapidement, (d'un à quelques mois) permet, après son extension à toute la Terre, une pénétration progressive dans la stratosphère. Dans cette couche atmosphérique, les Fréons ne sont plus invulnérables car ils pénètrent dans la région où l'ultraviolet solaire de longueurs d'onde inférieures à  $0,2 \mu\text{m}$  les photodissocient et libèrent les atomes de chlore qui peuvent ainsi attaquer catalytiquement l'ozone. Il faut que l'acide chlorhydrique (HCl) se forme pour qu'une accumulation de chlore atomique puisse être évitée dans la stratosphère. Des observations récentes (octobre 1975) effectuées à partir d'une plate-forme stratosphérique à 40 km par l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique indiquent que déjà aujourd'hui (voir figure 7) l'acide chlorhydrique est bien présent avec des concentrations démontrant la pénétration de composés chlorés naturels (et peut-être artificiels) de la troposphère dans la stratosphère. En tout cas, les mesures de Lovelock (1975) effectuées depuis plusieurs années dans l'hémisphère sud où la production industrielle des Fréons est insignifiante, révèlent que le trichlorofluorométhane a vu sa concentration troposphérique augmenter de quelque 10 % chaque année.

En conséquence, le problème posé à la communauté scientifique consiste à définir au mieux les conditions actuelles et à prédire, si possible, les conditions d'évolution de la couche d'ozone stratosphérique. Il apparaît simple d'émettre un avis indiquant que l'effet de l'hydroxyle, de l'oxyde d'azote, du chlore, du brome... sur l'ozone est indubitable et qu'il devrait se manifester d'autant plus dans la stratosphère que l'accroissement continu de la production industrielle atteint ou dépasse la production naturelle. Cependant, il devient difficile, d'accepter sans une certaine réticence toute prédiction numérique fixant un pourcentage précis dans la diminution de l'ozone atmosphérique à une époque déterminée, peut-être surtout dans le cas d'une connaissance approfondie de la complexité des phénomènes atmosphériques, en particulier de la stratosphère. Entre la conception d'un modèle stratosphérique, par lequel on essaie de simuler au mieux le passage d'un état normal à un état perturbé inconnu et la représentation exacte du comportement extrêmement variable de conditions atmosphériques, il y a des différences dont, trop souvent, on apprécie difficilement l'ampleur. Il ne s'agit pas en effet d'admettre ou de rejeter, avec bonne ou mauvaise conscience, des résultats de calculs correspondant à des équations différentielles pour lesquelles on a cherché de fixer au mieux des conditions aux limites. De même, il ne peut être question de se fier à son instinct dans le diagnostic de situations physiques dont les conditions ne peuvent

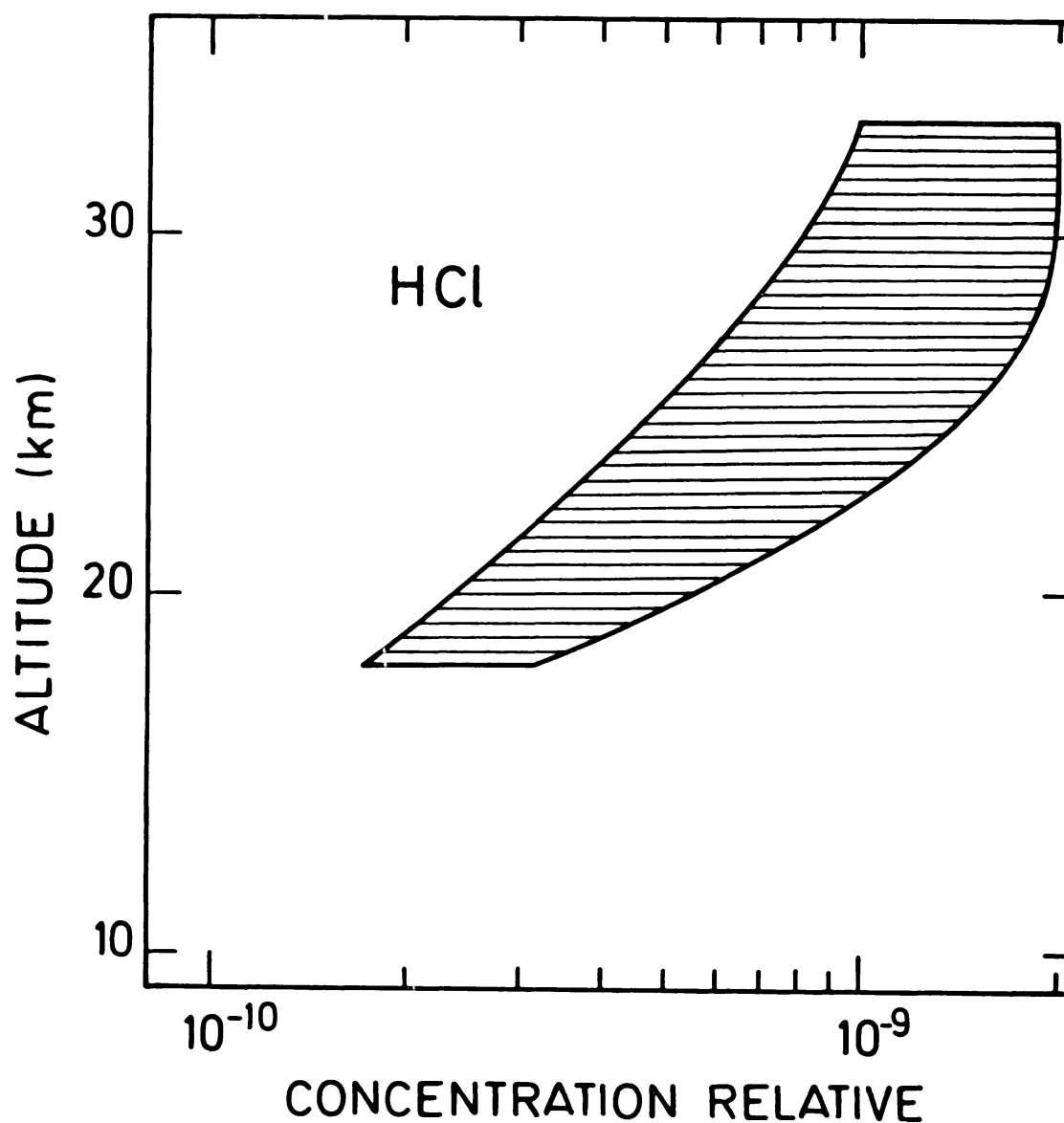


Fig. 7. — Distribution verticale stratosphérique de la concentration relative de la molécule d'acide chlorhydrique observée pour la première fois jusqu'à 35 km le 2 octobre 1975 par Ackerman, Frimout, Girard, Gottignies et Muller (1975). IASB et ONERA.

être déterminées avec certitude par suite des circonstances (insuffisance du nombre d'études et de recherches fondamentales) et de là à pronostiquer sans délai des événements au gré des désirs d'un législateur éventuel.

En tout cas, le débat qui est passé dans le domaine public, comme je l'ai souligné au début de mon discours, n'est pas terminé. Il sera

porté devant des « instances internationales » où beaucoup de paroles seront encore prononcées faisant même appel, par nécessité dans certains cas, à des données que seule la science peut apporter. Ainsi, le scientifique devra encore ouvrir, car d'aucuns feront toujours la science même si d'autres lui font la guerre. Mais, conscient de ce que les propos que je viens de tenir dans cette enceinte ne pèseront guère sur l'événement, je ne puis m'empêcher, surtout à l'heure du pétrole, de constater en terminant que, comme le souligne l'Histoire, les Croisades furent une faillite alors que la Renaissance a été un succès.