

Une vision rationnelle de l'ozone stratosphérique

Hugh Elsaesser

Hugh W. Elsaesser, docteur ès sciences, est chercheur invité à la Division de recherches sur le climat global du Lawrence Livermore National Laboratory, aux Etats-Unis. Elsaesser a passé 20 ans dans l'Armée de l'Air américaine, en tant qu'officier météorologiste, puis 23 ans au Lawrence Livermore Laboratory, en tant que chercheur sur l'atmosphère et le climat. Cet article est adapté de sa présentation lors d'un symposium qui eut lieu à Vienne en mai 1994. Il est réimprimé avec l'aimable permission de notre confrère 21st Century Science & Technology.

Au cours du dernier quart de siècle, la « couche d'ozone » a souvent défrayé la chronique, étant généralement décrite comme une « couche mince et fragile ». Afin de pouvoir nous en faire une idée, nous montrons en **figure 1** comment les rapports de mélange de l'ozone global moyen changent avec l'altitude. (le rapport de mélange est le rapport du nombre de molécules d'ozone présentes dans un volume donné sur le nombre de molécules d'air présentes dans le même volume).

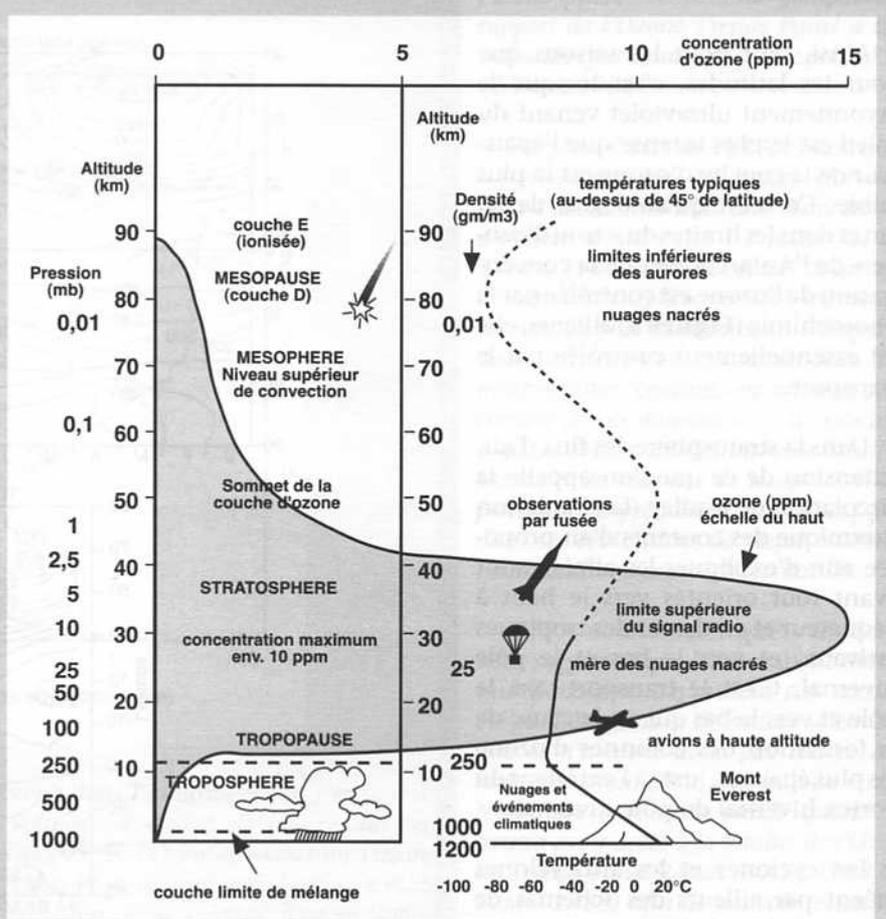
Si un volume d'air s'élève ou s'abaisse sans subir de mélange ou d'action chimique, le rapport de mélange ne change pas, bien que le nombre total de molécules d'air par unité de volume diminue de moitié à chaque fois que l'on monte de 18.000 pieds (6 kilomètres).

A partir d'une valeur moyenne de 0,03 parties par million (ppm) à la surface du sol, le rapport de mélange augmente assez constamment avec l'altitude jusqu'à la tropopause, qui se trouve environ à 10 km aux pôles et à 16 km sous les tropiques. Juste au-dessus de la tropopause, il atteint 1 ppm et augmente, plutôt rapidement, jusqu'à un maximum de 10 à 15 ppm autour de 35 km. Passé ce pic, il décroît, encore plus rapidement, jusqu'à atteindre 1 à 2 ppm autour de 50 km, s'abaissant ensuite plus lentement jusqu'à environ 0,1 ppm autour de 90 km, avant de remonter à nouveau, au-dessus de 90 km.

Bien que la majorité de l'ozone se trouve dans la basse stratosphère et que le rapport de mélange élevé que l'on y trouve puisse être représenté comme une couche, l'ozone se répand donc dans la majeure partie de l'atmosphère. On mesure l'ozone en évaluant l'épaisseur équivalente de la couche d'ozone qui serait formée si l'on comprimait à la surface terrestre toutes les molécules d'ozone en une seule couche d'ozone pure, à des conditions normales de température et de pression.

L'épaisseur moyenne de la couche d'ozone, ainsi définie, est d'environ 300 UD (unités Dobson, du nom du

Figure 1 - Distribution moyenne de l'ozone dans l'atmosphère



La zone ombragée représente schématiquement la distribution moyenne de la concentration en ozone (« rapport de mélange ») dans l'atmosphère, exprimée en parties par million (voir l'échelle du haut). Le diagramme de la structure atmosphérique est tiré de Lamb (1972, p. 9).

grand chercheur britannique sur l'ozone, Gordon Dobson). Cette épaisseur moyenne est de 0,3 cm, ce qui correspond à un demi-millionième de l'épaisseur de toute l'atmosphère terrestre si elle était comprimée suivant les mêmes conditions. C'est de cette méthode permettant de quantifier l'ozone dans l'atmosphère qu'est né le concept d'une couche d'ozone mince et fragile.

Au-dessus du niveau maximum du rapport de mélange, l'ozone est en équilibre chimique et se détruit aussi vite qu'il ne se forme. Si l'équilibre est perturbé, la « demi-temps » de rétablissement de l'équilibre photochimique, qui diminue rapidement avec l'altitude, est d'environ 5 jours à

35 km. En dessous de 35 km, la concentration en ozone est généralement au-dessus du niveau d'équilibre, mais la durée requise pour le rétablissement est si longue (6 mois à un an à 25 km) qu'on peut considérer l'ozone comme étant en réserve dans des conditions normales.

Pour ce qui est de la latitude, l'épaisseur de l'ozone est minimale (250 à 270 UD) près de l'équateur et elle s'accroît presque jusqu'au double de cette valeur vers 90° de latitude Nord au printemps, et à des valeurs un peu inférieures vers 60° de latitude Sud (Figure 2). Les valeurs polaires sont généralement moindres que les pics rencontrés sous ces hautes latitudes, sauf dans l'hémisphère nord, en hiver.

Sous les hautes latitudes, c'est en été et en automne que la couche d'ozone est la plus mince, et c'est au printemps et en hiver qu'elle est la plus épaisse.

Ainsi, tant pour les saisons que pour les latitudes, c'est lorsque le rayonnement ultraviolet venant du soleil est le plus intense que l'épaisseur de la couche d'ozone est la plus faible. Ce n'est qu'au-dessus de 35 km et dans les limites du « trou d'ozone » de l'Antarctique que la concentration de l'ozone est contrôlée par la photochimie (**Figure 3**) ailleurs, elle est essentiellement contrôlée par le transport.

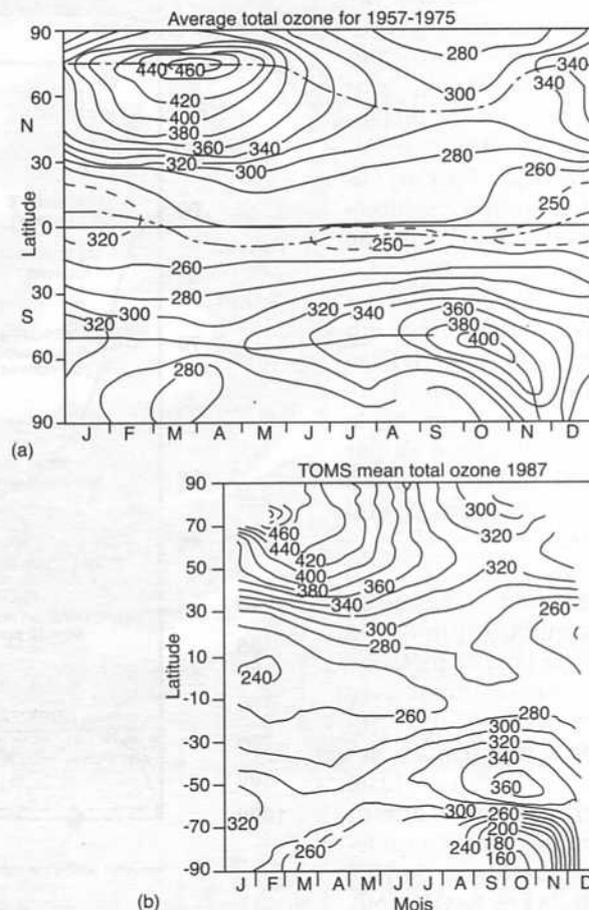
Dans la stratosphère, les flux d'air, extension de ce que l'on appelle la circulation de Hadley (la circulation thermique des courants d'air proposée afin d'expliquer les alizés), sont avant tout orientés vers le haut à l'équateur et au-dessus des tropiques estivaux, et vers le bas et le pôle hivernal. C'est le transport vers le pôle et vers le bas qui est la cause de la formation des colonnes d'ozone les plus épaisses, juste à l'extérieur du vortex hivernal du pôle hivernal.

Les cyclones et les anticyclones créent par ailleurs des schémas de transport dans la basse stratosphère qui exercent chaque jour un effet puissant sur l'épaisseur de la couche d'ozone. Les cyclones sont accompagnés d'un mouvement vers le bas dans la basse stratosphère, qui ramène vers le sol un air pourvu d'un rapport de mélange d'ozone élevé. Comme l'air « manquant » est remplacé par un air à fort rapport de mélange se déplaçant horizontalement, de colonnes d'ozone épaisses sont associées aux cyclones. Le schéma inverse joue pour les anticyclones, ce qui entraîne de faibles valeurs de la colonne d'ozone associée aux anticyclones.

Menaces sur la couche d'ozone

En 1971, commencèrent les prédictions selon lesquelles des produits chimiques émis par l'homme allaient

Figure 2 - Variation de l'ozone total en fonction de la latitude et de la saison, en unités Dobson



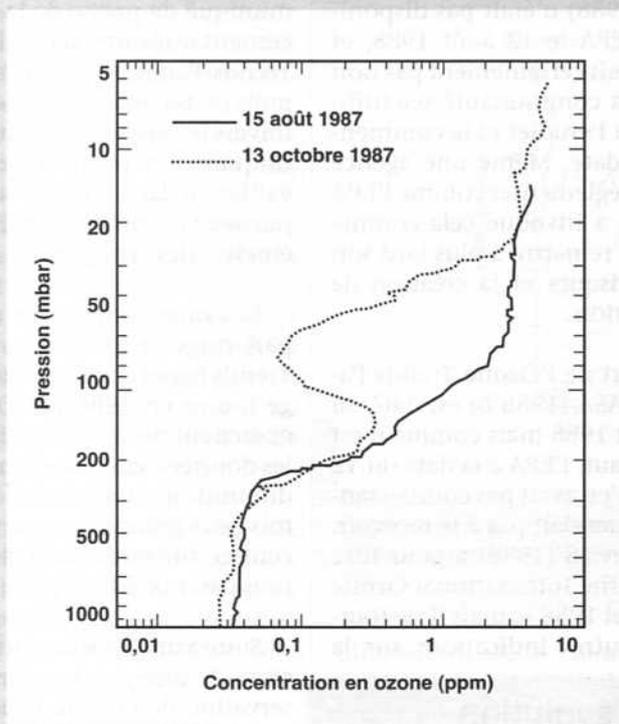
Les observations effectuées de 1957 à 1975 et compilées par London (1980) apparaissent en (a) et celles provenant du Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) pour 1987 en (b) ; La baisse d'ozone n'est évidente que dans les alentours du trou d'ozone dans l'hémisphère sud.

détruire l'ozone et conduire à un accroissement des ultraviolets atteignant la surface, et par conséquent à une augmentation des cancers de la peau. L'inquiétude initiale portait sur la vapeur d'eau provenant des réacteurs des avions de transport supersonique. Il est stupéfiant que personne n'ait alors souligné qu'en se basant sur les observations disponibles, on pouvait constater que l'ozone stratosphérique et la vapeur d'eau **augmentaient** depuis plusieurs années (Elsaesser, 1982).

Les partisans de la théorie de la disparition de l'ozone ne mirent pas longtemps avant d'accuser les oxy-

des d'azote provenant des avions supersoniques. Plus tard, grâce aux vols de la navette spatiale, on découvrit que le chlore et le brome pouvaient aussi détruire l'ozone de façon catalytique. Cependant, les sources d'émissions de ces produits chimiques étaient trop faibles pour provoquer beaucoup d'inquiétude. Le chlore ne devint un sujet d'inquiétude majeur pour la destruction de l'ozone qu'après que le chimiste Sherwood Rowland, de l'Université de Californie, et son assistant Mario Molina aient déduit que la décomposition photolytique dans la stratosphère était le seul puits d'importance pour les halons et les CFC et que cela

Figure 3 - Concentration en ozone au-dessus de Halley Bay



Des mesures sur la concentration en ozone dans l'atmosphère en fonction de l'altitude, en partie par million par volume, au-dessus de Halley Bay, en antarctique, avant (ligne pleine) et après (pointillés) la formation du trou d'ozone de 1981. En raison de la baisse de pression et de densité avec l'altitude et de l'échelle logarithmique utilisée ici, la fraction de la colonne d'ozone totale détruite est considérablement plus grande qu'on ne pourrait l'estimer en se basant sur ce graphique

Source : adaptée de Gardiner 1988

pourrait constituer une source importante de chlore. L'attaque principale par le chlore était attendue autour de 40 km d'altitude. Avec un rejet continu de CFC au taux standard, le système était sensé atteindre un point d'équilibre dans 75 à 100 ans, le chlore rejeté par les CFC ayant alors causé un aminuement de la couche d'ozone « de peut-être 5 % vers le milieu du XXIème siècle ». (Solomon 1990)

Citons les termes d'un groupe de théoriciens de la diminution de l'ozone, Stolarski et al. (1992) : « La recherche de preuves montrant une tendance à la baisse de la couche d'ozone resta sans résultat jusqu'à la découverte du trou d'ozone dans l'Antarctique en 1985 ». Stolarski et al. citent Farman et al. comme étant les découvreurs. (1985)

Et qu'avait donc à dire l'agence de protection de l'environnement (EPA) des Etats-Unis à propos des risques d'épuisement de l'ozone ? En 1988, l'EPA écrivait cet avertissement de prochaine réglementation dans le Journal Officiel (1988, p 30604) : « Compte tenu de l'étude majeure publiée par l'organisation mondiale de la météorologie (WMO 1986) et de la propre étude de risques de l'EPA (EPA 1987), il n'y a eu aucune variation statistiquement significative dans les estimations globales de la colonne d'ozone totale (c'est-à-dire la quantité d'ozone à partir de la surface terrestre jusque dans la stratosphère, en tout point du globe) ».

Le même avis fourni par l'EPA ajoutait (à la page 30.605) que « l'existence du trou d'ozone avait été bien documen-

tée par les chercheurs » et « qu'à la suite d'une révision de 18 mois, comprenant plus d'une centaine des meilleurs scientifiques mondiaux de l'atmosphère, le résumé général du rapport de l'Ozone Trends Panel a été transmis (par communiqué de presse) le 15 mars 1988 ».

De plus, l'avis de l'EPA notait que « son examen des tendances globales pour l'ozone montrait une diminution d'ozone variant entre 1,7 et 3,0 %, de 1969 à 1986, entre 30° et 64° de latitude dans l'hémisphère nord (où les mesures sont les plus nombreuses). » Cependant, affirme l'avis, « les modèles atmosphériques courants ne rendent pas compte de ces données » et il conclut « qu'en raison d'informations insuffisantes et du manque de temps, il était prématuré de prendre en compte ces faits dans ses évaluations de risque ou dans l'élaboration d'une réglementation. »

L'EPA notait aussi que « les données suggérant que l'ozone avait diminué globalement n'avaient pas encore été publiées dans la littérature scientifique et n'avaient donc pas encore été revues en profondeur » et qu'elle « entend faire savoir au public quand il pourra avoir accès à la totalité de l'Ozone Trends Panel Report (NASA 1988 b, WMO 1988) afin de pouvoir recueillir des commentaires sur ses conséquences concernant une action future ».

Déductions intéressantes

Plusieurs déductions intéressantes peuvent être tirées des références mentionnées plus haut.

Premièrement, après 14 années de prédictions annonçant des pertes d'ozone en raison des produits chimiques relâchés par l'homme, la première preuve liée à des observations, établissant que de telles pertes existent, fut la détection de la chute sans précédent en ozone au-dessus de l'Antarctique, entre septembre et octobre 1985, une chute qui survint entre 12 et 22 km et non aux 40 km d'altitude où la destruction de l'ozone par le chlore était supposée être la plus importante.

Deuxièmement, les prédictions sur le trou d'ozone ont suffi pour que certains intérêts travaillant principalement à travers le programme pour l'environnement des Nations-Unies (UNEP) lancent une série de conférences internationales qui culminèrent avec la signature du « Protocole de Montréal sur les substances qui réduisent la couche d'ozone », le 14 septembre 1987.

Selon Richard Benedick, le négociateur en chef pour les Etats-Unis, concernant la création du traité (Benedick 1991, préface) :

« L'aspect le plus extraordinaire de ce traité fut l'imposition de coûts économiques à court terme afin de protéger la santé humaine et l'environnement contre des dangers futurs non prouvés... des dangers qui reposent sur des théories scientifiques plutôt que sur des données solides. A l'époque des négociations et de la signature du traité, il n'existait aucune preuve tangi-

ble, mesurable, du dommage » (c'est nous qui soulignons).

Troisièmement, le rapport de l'Ozone Trends Panel (NASA 1988 b) ; WMP 1988) n'était pas disponible pour l'EPA le 12 août 1988, et donc ne l'était certainement pas non plus pour la communauté scientifique voulant l'étudier et le commenter à cette date. Même une agence prompt à réglementer comme l'EPA américaine, a invoqué cela comme raison pour remettre à plus tard son étude des risques et la création de réglementation.

Le rapport de l'Ozone Trends Panel de la NASA (1988 b) est daté du mois d'août 1988 mais comme il est noté plus haut, l'EPA à la date du 12 août 1988 n'en avait pas connaissance et ne s'attendait pas à le recevoir. Le rapport n°18 (1988) a pour titre « Report of the International Ozone Trends Panel 1988 », mais il ne fournit pas d'autres indications sur la

date de publication. Je n'ai pas été en mesure de déterminer avec précision quand ce rapport devint disponible.

En d'autres termes, suite au communiqué de presse de la NASA concernant le résumé général de l'Ozone Trends Panel et durant au moins 5 mois ce document rebondit ici et là à travers les médias, sans que les scientifiques — y compris ceux qui travaillèrent dans le comité d'experts — puissent le commenter, l'étudier ou émettre des critiques.

Le Congrès américain avait au départ exigé la formation de l'Ozone Trends Panel en raison du témoignage fourni en 1986 par Don Weath, chercheur de la NASA, affirmant que les données-satellite montraient une diminution massive de l'ozone, 2 à 3 fois plus grande que prévue et concentrée surtout autour de 50 km, et non pas aux 40 km prédits.

Suite à une révision critique et une seconde analyse des données d'observation de l'ozone issues d'instruments Dobson, de fusées et d'au moins sept systèmes de satellites, l'Ozone Trends Panel concluait que :

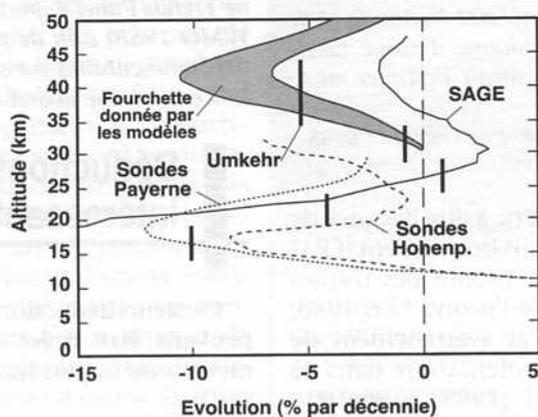
- Les données les plus crédibles sur l'ozone en fonction de l'altitude et du temps sont celles que fournissent les systèmes satellitaires SAGE (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment). Pour la période s'étendant de 1979 à 1985, ces données :

- 1) ne sont pas arrivées à confirmer la diminution de l'ozone total d'environ 1 % par an et la chute plus rapide d'environ 3 % par an à près de 50 km de haut enregistrées par les systèmes SBUV (Solar Backscatter Ultraviolet Spectrometer) et TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) ;

- 2) ont montré une diminution de l'ozone à 40 km variant de 3 à 9 %, comparée aux prévisions basées sur modèle, de 5 à 12 % pour cette période (**Figure 4**) ;

- 3) ont indiqué une réduction inattendue de l'ozone de 3 % à 25 km et au-dessous. Cela s'avéra représenter la plus grande partie de la diminu-

Figure 4 - Variations dans l'évolution de l'ozone selon l'altitude



Même la petite baisse de l'ozone stratosphérique prédite par la théorie actuelle sur la diminution de l'ozone ne se produit pas. Entre temps, l'ozone global total s'accroît. La faible baisse d'ozone mesurée à 40 km d'altitude n'est que la moitié de celle prédite par les modèles. Le graphique montre les résultats de plusieurs systèmes de mesure : des données du satellite SAGE sont une moyenne couvrant les latitudes entre 20°N et 50°N, et entre 20°S et 50°S. Les données du système de suivi au sol allemand Umkehr fournissent une moyenne englobant 5 stations situées aux latitudes septentrionales moyennes. Les résultats de deux ballons-sondes à ozone sont aussi indiqués. La zone ombrée indique deux calculs de modèles à 50°N et 50°S.

source : adapté de l'OMM 1991, figure 2-18

tion notée dans la colonne d'ozone total (Figure 5).

- Les spectromètres SBUV et TOMS indiquaient des diminutions excessivement rapides de l'ozone à cause de la détérioration d'une plaque de diffusion. Après normalisation par comparaison avec les mesures au sol d'instruments Dobson, ils montrèrent une diminution de 2 à 3 % de l'ozone total entre 53° de latitude nord et 53° de latitude sud d'octobre 1978 à octobre 1985. Cette période coïncide avec la phase déclinante du cycle des tâches solaires, dont on estima qu'elle avait causé une réduction d'ozone de 0,7 à 2 %, d'après des estimations sur la réduction des UV au cours de cette période. La diminution effective de l'ozone total allait donc de 0 à 2 %.

Selon l'Organisation Mondiale de la Météorologie (1988, vol 1, p 440), « une variation d'au moins 4 % serait probablement nécessaire pour être détectée de façon sûre comme étant un changement (par les instruments du satellite examinés) »

- Les données des instruments Dobson corrigées et analysées à nouveau, indiquaient pour l'hémisphère nord une diminution moyenne annuelle de l'ozone total de 1969 à 1986, de 1,7 % à 30° de latitude nord, à 3,0 % à 64° de latitude nord ; pour l'hiver les valeurs étaient de 2,3 % et 6,3 %.

Constatations ou peurs

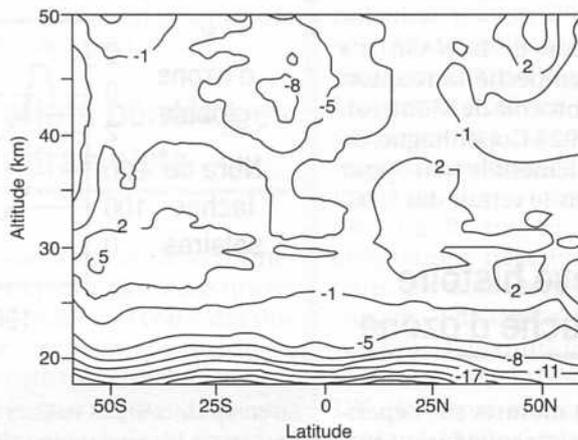
En résumé, les rapports de l'Ozone Trends Panel ont trouvé :

1) une diminution de l'ozone total à 40 km de haut — mais seulement la moitié environ de celle prédite par les modèles ;

2) une diminution de l'ozone total dans les latitudes médianes nordiques, significative seulement en hiver — mais près du double de celle prévue par les modèles ;

3) de façon complètement inattendue, que la majeure partie de la

Figure 5 - Evolution de l'ozone selon la latitude et l'altitude (1979-1991)



Profils dérivés des mesures effectuées par les satellites SAGE I et SAGE II sur l'ozone stratosphérique, en % par décennie, en fonction de la latitude et de l'altitude.

Source : adapté de l'OMM 1991, figure 2-17

diminution de la colonne d'ozone total était le fait de diminutions à 25 km et au-dessous — plutôt qu'à 40 km comme prévu par les modèles.

Comment furent présentés ces faits au public ? Citons les termes du président du comité, le Dr Robert Watson, de la NASA : « [nos modèles] sur l'ozone n'expliquent pas le fait que l'ozone ait pu décroître comme il l'a fait au-dessus de l'hémisphère nord au cours des 17 dernières années. Nos modèles ne font pas un bon travail, au point que l'on devrait dire qu'ils sous-estiment les diminutions futures ». (Kerr 1988)

Est-ce cela la logique d'un scientifique confirmé ?

La politique scientifique de l'Ozone Trends Panel en 1988, qui reposait sur des communiqués de presse, plutôt que sur la publication des derniers développements dans des revues à comité de lecture, baissa encore d'un cran en 1992. Le Dr James Andersen de Harvard, le scientifique en chef pour « l'expédition aérienne de la NASA dans la stratosphère arctique » annonça dans une conférence de presse le 3 février 1992 que l'avion de l'expédition ER-2 avait détecté les plus hautes concentrations de monoxyde de chlore jamais rencontrées

(par celui-ci) dans la partie du vortex arctique au-dessus de l'est du Canada et du nord de la Nouvelle-Angleterre (le fameux trou au-dessus de la résidence du Président Bush à Kennebunkport dans le Maine) — plus hautes même que celles détectées lors de vols à l'intérieur du trou d'ozone de l'Antarctique.

Selon Andersen, « La capacité de l'atmosphère à combattre le chlore (destructeur d'ozone) est plus faible que nous le pensions précédemment. Le système est en train de s'écrouler dans des régions locales ; nous ne savons pas s'il va être réduit en lambeaux sur une plus grande échelle... si le vortex persiste on peut s'attendre à de grandes pertes d'ozone, » de l'ordre de 30 à 40 % (Kerr 1992).

Ceci capta rapidement l'attention de William Reilly, alors administrateur de l'EPA et d'Al Gore, alors sénateur. En l'espace de deux jours, le sénat américain vota, par 96 voix pour et 0 voix contre, pour faire avancer l'interdiction des CFC de l'an 2000 à 1995. Le Président Bush entreprit cette action pour les Etats-Unis le 11 février 1992.

Dix semaines plus tard, le 30 avril 1992, la NASA tint une autre conférence de presse pour annoncer que

les hauts niveaux observés d'oxyde de chlore avaient apparemment été « neutralisés » en grande partie grâce à l'air hivernal inhabituellement chaud (Leary, 1992). En d'autres mots, il n'y avait pas de désastre !

Cette correction de la NASA n'a cependant pas empêché la réunion des parties au Protocole de Montréal, en novembre 1992 à Copenhague, de modifier officiellement le traité pour accélérer de 5 ans le retrait des CFC.

Une brève histoire de la couche d'ozone

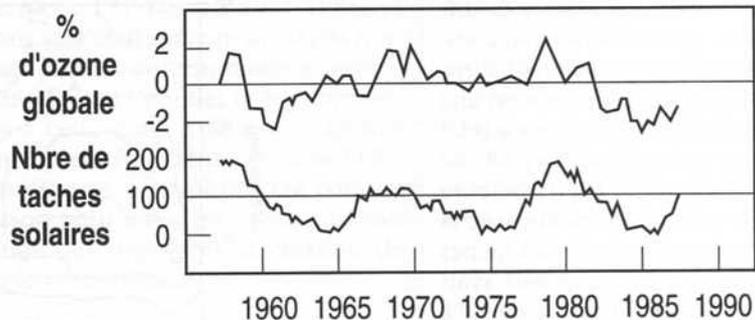
Les premières mesures sur l'épaisseur de la couche d'ozone furent réalisées vers 1913. Des relevés de routine furent commencés à Oxford, en Angleterre et à Arosa, en Suisse, à la fin des années 20 et à Tromsø en Norvège, Lerwick en Ecosse et dans quelques autres stations durant les années 30. On ne peut prétendre qu'il y a eu une couverture globale avant l'année internationale de géophysique de 1957-1958.

La **figure 6** montre (courbe supérieure) une courbe « adoucie » de l'ozone total réalisée par Jim Angell (1989) Notez :

- la ressemblance avec la courbe du nombre de taches solaires (courbe inférieure) ;
- le minimum de -2,3 % au-dessous de la normale en 1961 légèrement dépassé seulement par le minimum de -2,9 % en 1986.
- La tendance à la hausse à long terme depuis 1961, jusqu'au pic de 1,7 % au-dessus de la normale de 1970 — le plus haut niveau d'ozone observé jusqu'à ce jour, qui n'a été égalé depuis qu'en 1979 et
- la tendance à la hausse à la fin de la courbe.

La plupart des lecteurs ne savent probablement pas qu'on a non seulement observé des augmentations d'ozone de 1985 à 1991 (Herman et Larko, 1994), mais qu'en plus, cela avait en fait été prédit par l'Ozone Trends Panel (NASA 1988 b ; WMO 1988).

Figure 6 - Corrélation entre le cycle des taches solaires et les variations de l'ozone global



La comparaison des valeurs saisonnières du nombre de taches solaires (courbe du bas) avec les variations régulières de l'ozone total global montre une étroite corrélation. L'intensité du rayonnement ultraviolet destructeur d'ozone provenant du soleil varie avec le nombre de taches solaires. Les données vont de 1958 à août 1988. Les valeurs saisonnières ont été lissées par un poids 1-2-1 affecté deux fois aux déviations saisonnières de la moyenne à long terme. Les indications annuelles marquent l'été nordique.

Source : adapté de Angell 1989

Nous n'avons pas d'explication pour la tendance à la hausse à long terme de l'ozone durant les années 60. Alors que la plupart des chercheurs utilisant les modèles d'ozone stratosphérique ont choisi d'attribuer le minimum de 1961 aux effets de l'oxyde d'azote provenant des tests sur la bombe à hydrogène faits par l'Union soviétique à Noraya Zembya en 1961-1962, la majorité des autres scientifiques de l'atmosphère qui ont examiné ces données ont rejeté cette explication pour les raisons suivantes :

1. presque toutes les baisses d'ozone sont survenues avant que les bombes aient explosé. Les données Angell (1989) montrent que le minimum enregistré dans l'hémisphère nord survint durant l'hiver de 1960-1961 - au moins 3 saisons avant la 1ère et la plus forte explosion, à l'automne en 1961. Les modèles prédisent que le minimum, dû aux bombes, aurait dû apparaître au début de 1963.

2. le temps de récupération est beaucoup plus long que si les bombes étaient responsables de la diminution d'ozone, car plus long que la période jugée nécessaire pour que les

NOx en excès soient expulsés de la stratosphère ;

3. du fait que la moyenne globale du niveau d'ozone en 1970 était la plus élevée jamais enregistrée, on peut difficilement parler de retour à la normale.

Il est donc difficile de ne pas tomber d'accord avec Guy Brasseur, modélisateur belge de l'ozone stratosphérique (1978), qui conclut : « Actuellement, aucun aspect des données ne peut être attribué aux explosions thermonucléaires de 1961-1962 ».

Parce que nous n'avons pas d'explication sur la tendance à la hausse de l'ozone pour les années 60, nous n'avons pas non plus de raison de ne pas nous attendre de temps à autres à un retour aux niveaux de 1961, par des causes naturelles.

La question des ultraviolets

Un point important des histoires à sensation sur l'ozone est l'annonce de milliers de cas additionnels de

cancer de la peau, dus à l'augmentation du rayonnement ultraviolet atteignant la surface de la terre résultant de l'épuisement du « bouclier » d'ozone.

Sur une base annuelle moyenne, le flux des UV de surface augmente environ de 50 fois des pôles à l'équateur (Mo et Green 1974). En d'autres termes, les gens vivant près de l'équateur reçoivent — naturellement — 50 fois plus d'UV que ceux vivant près des pôles. La moyenne mensuelle estivale maximum augmente environ 10 fois (WMO, 1991, Figures 11-10). Pour la moyenne annuelle, on double approximativement sa dose chaque fois que l'on se déplace de 1600 km des pôles à l'équateur, ce qui revient en gros à une augmentation de 1 % pour chaque déplacement de 16 km vers l'équateur.

L'Académie Nationale des Sciences des Etats-Unis estime la distance de doublement de l'incidence du cancer de la peau entre 8° et 11° de latitude, soit une augmentation de 1 % des cancers de la peau pour un déplacement de 10 km vers l'équateur (1975). Le WMO estime qu'une diminution de 1 % dans l'épaisseur de la couche d'ozone conduira à une augmentation de 2,3 % dans les cas ordinaires de cancer de la peau (1991). En se basant sur ces chiffres, une diminution dans l'épaisseur de la couche d'ozone de 1 % équivaut à se déplacer de 25 km vers l'équateur pour ce qui est de son effet sur l'incidence des cancers de la peau.

On a ici une mesure facile à comprendre par laquelle n'importe qui peut évaluer le sérieux du débat sur la diminution de l'ozone. La diminution de 5 % en ozone prédite par les modèles, en faisant l'hypothèse d'un usage continu des CFC jusqu'à l'obtention d'un équilibre, équivaut à une augmentation de 11,5 % des cancers de la peau ou à un déplacement d'environ 110 km, en direction de l'équateur. Y a-t-il quelqu'un qui considère comme dangereux de déménager de 110 km vers le sud, par exemple de New York à Philadelphie, de Paris à Orléans ou de Rennes à Nantes ? Si le pire scénario des tenants de l'épuisement de l'ozone

aboutit seulement à une augmentation en UV correspondant à un déplacement de 110 km vers le sud, est-ce que ce « risque » est si grave qu'il exige l'interdiction de fluides réfrigérants sûrs, efficaces et peu coûteux, ou un traité international comme le Protocole de Montréal.

Les effets bénéfiques des ultraviolets

Les effets bénéfiques du rayonnement UV font partie des sujets qui ne sont jamais abordés au cours des discussions sur l'ozone stratosphérique. Pour la plupart des animaux terrestres vertébrés (y compris l'homme), la seule source naturelle de vitamine D, nécessaire au métabolisme du calcium dans les os, provient de l'action des UV solaires sur les corps gras de la peau. Une carence en vitamine D durant les années de croissance peut provoquer le rachitisme et plus tard dans la vie, l'ostéomalacie (perte en os atteignant un niveau dangereux).

Aux Etats-Unis, on estime que 20 à 25 millions de personnes souffrent maintenant d'ostéomalacie, dont 25 % des femmes ayant passé la ménopause. Parmi ce groupe les fractures d'os (typiquement du fémur) sont annuellement deux fois plus nombreuses que les nouveaux cas de cancers de la peau.

Théoriquement, une augmentation de l'exposition aux UV pourrait tout aussi bien soulager cette condition dans les générations futures que causer des cas additionnels de cancer de la peau. Etant donné le nombre de gens touchés et le caractère relativement sérieux des effets sur la santé considérés, une diminution dans l'épaisseur de la couche d'ozone pourrait s'avérer être un *bénéfice net pour la santé*, en particulier si l'on sait que nos corps sont beaucoup plus aptes à nous faire savoir quand nous recevons trop d'UV, qu'à nous dire quand nous en recevons trop peu. Cet aspect bénéfique d'une exposition à une dose supplémentaire d'UV est encore plus important du fait de la migration massive des gens à la

peau plus sombre vers les latitudes plus élevées, où ils reçoivent moins d'UV.

Bien que je n'aie pu trouver que peu d'ouvrages sur ce sujet, il pourrait bien y avoir d'autres maladies sujettes à amélioration grâce à une augmentation de l'exposition aux UV. Les docteurs Cedric F. Garland, Franck C. Garland et Edward D. Gorham ont étudié l'incidence des cancers du colon et du sein sur une période allant de 10 à 20 ans. Ils ont trouvé des corrélations négatives significatives entre les taux de mortalité par ces cancers et la disponibilité en vitamine D, ou la quantité totale de lumière solaire (un substitut « loyal » pour les UV (voir, par exemple, Garland et Garland 1980 ; Garland et al, 1986 ; Gorham et al. 1989).

Ne devrions nous pas étudier davantage cette possibilité avant de prendre des décisions hâtives en nous interdisant d'utiliser les propriétés très spéciales de produits comme les CFC, les halons ou le chlorure de méthyle ?

Autre explication de la diminution de l'ozone

La circulation d'air dans la stratosphère est une extension vers le haut de la circulation de Hadley. Elle se compose principalement d'un mouvement ascendant à travers la tropopause à l'équateur et au niveau des tropiques estivaux, et d'un mouvement descendant en direction des pôles, surtout le pôle hivernal. Dans cette circulation cyclique hémisphérique antisymétrique conduite par le mouvement saisonnier du point subsolaire à l'intérieur de l'hémisphère d'été, l'ozone est transporté de la région où il est endendré, sous les tropiques, à 35 km d'altitude, en direction du bas, vers la basse stratosphère de l'hémisphère d'hiver. C'est le refroidissement adiabatique de la branche ascendante de cette circulation qui est responsable du minimum permanent de température au niveau de la tropopause tropicale, en dépit de la chaleur apportée par rayonnement dans cette région.

Du fait que l'air ascendant se refroidit de façon adiabatique et que la température de l'air augmente avec l'altitude dans la stratosphère, au-dessus de la tropopause cet air ascendant doit équilibrer sa vitesse d'ascension avec son taux de réchauffement radiatif. Cela signifie que la trajectoire réelle dans la stratosphère dépendra à la fois de la vitesse de montée à travers la tropopause et du taux de réchauffement radiatif dans la stratosphère. Si l'air arrive trop rapidement, il subit alors un refroidissement adiabatique le rendant plus dense que l'air environnant, et il est forcé de se déplacer davantage à l'horizontale qu'à la verticale. Dans ce cas, cet échange tendrait à ramener de l'ozone de la basse stratosphère vers la troposphère.

Autre possibilité, si l'air stratosphérique ascendant contient des absorbants, comme les aérosols, il sera davantage réchauffé, du fait de l'absorption par ces aérosols du rayonnement solaire et de l'infrarouge venu de la Terre, ce qui l'amènera à monter plus facilement et rapidement. Cela tendra à pousser l'air à plus haut rapport de mélange se trouvant à mi-hauteur de la stratosphère, vers le bas et vers le pôle. Du fait que l'air qui atteint les 35 km se trouve rapidement en équilibre photochimique, ce type de circulation pourrait augmenter l'ozone dans la stratosphère, comme cela a lieu après les bouleversements en profondeur de la stratosphère que l'on appelle réchauffements stratosphériques soudains (Elsaesser 1978).

Donc, non seulement les détails spécifiques de la circulation dans la stratosphère sont responsables du cycle saisonnier de l'épaisseur de la couche d'ozone, mais ils peuvent avoir aussi un impact significatif sur ses variations d'une année sur l'autre.

Depuis l'éruption du volcan Agung en 1963, nous savons que les panaches volcaniques dans la stratosphère provoquent un réchauffement additionnel et par conséquent une ascension de l'air qui les environne. L'effet initial est de remonter le profil de l'ozone présenté à la figure 1, en remplissant la basse stratosphère avec

de l'air à faible rapport de mélange en ozone, et en faisant monter la partie supérieure de la couche d'ozone, à une altitude où son rapport de mélange est au-dessus de l'équilibre chimique, et où l'ozone revient à un niveau d'équilibre en l'espace de quelques jours. Le résultat net est une diminution de l'ozone total dans les colonnes envahies par le panache. Il peut y avoir aussi une destruction chimique de l'ozone par les particules elles-mêmes.

Les effets du réchauffement et de l'ascension sont maximum lorsque la majeure partie du bioxyde de soufre injecté par les volcans est oxydée en particules de sulfates (environ 2 mois), mais certains effets peuvent durer aussi longtemps que les particules demeurent dans la stratosphère (leur demi-vie est d'environ 18 mois). Par ailleurs, le taux de destruction chimique dépend de la surface de contact des aérosols par unité de volume, du nombre de molécules d'ozone par unité de volume, et est inversement lié à la température. Cette destruction serait donc plus importante lorsque les aérosols volcaniques s'approchent des latitudes plus hautes et plus froides de l'hémisphère d'hiver, où la densité en ozone est également élevée.

Nous avons assisté à des chutes de l'ozone total global après l'éruption de l'Agung en 1963 et celle du El Chichon en 1982, chutes qui durèrent environ un an, et qui furent maximum pendant l'hiver suivant ces éruptions. La chute provoquée par l'Agung semble aussi avoir été plus forte dans l'hémisphère sud où les aérosols plus denses furent observés. Par contre, une chute similaire fut observée en 1985, sans qu'il y ait eu d'éruption détectée. Après l'éruption du Pinatubo en juin 1991, l'ozone total amorça une chute qui devait durer jusqu'à l'hiver 93, mais qui semble depuis s'atténuer. C'est un comportement sans précédent après une éruption volcanique, à moins que la chute de 1985 ne soit attribuable au El Chichon.

Juger des tendances à long terme dans l'ozone total global en se basant sur tout cela n'est pas du tout évi-

dent. En 1986, il y eut un cycle solaire minimum qui a peut-être eu un impact inhabituellement élevé sur l'ozone. Nous venons juste de passer à travers une chute importante et prolongée sans précédent de l'ozone à la suite d'une injection volcanique d'une importance inhabituelle. La tendance actuelle est de supposer que les baisses inaccoutumées en ozone depuis le pic de 1979 résultent d'une destruction provoquée par le niveau croissant de chlore dans la stratosphère, même si les mécanismes en sont inconnus. En tous cas, les mécanismes ne sont certainement pas ceux prédits par la théorie de Molina et Rowland (1974).

Selon les gros titres, l'ozone a diminué « 2 à 3 fois plus vite que prévu ». Est-ce une raison pour paniquer, ou bien est-ce une raison pour reconnaître que nous ne savons pas actuellement ce qui se passe avec l'ozone stratosphérique, et que nous devrions donc attendre un peu jusqu'à ce que l'on sache à quoi s'en tenir ?

L'ozone total global atteignit un sommet inégalé en 1979. Aussi longtemps que nous ne pourrons pas expliquer l'augmentation à long terme de l'ozone qui commença durant les années 60, nous n'avons aucune raison de ne pas nous attendre à une tendance semblable et prolongée à la baisse, due à des causes naturelles, et à quel meilleur moment pouvait-elle débiter qu'après le pic qui survint en 1979 ? Existe-t-il d'autres développements dans le système climatique suivant lesquels nous pourrions nous attendre à une telle tendance à la baisse ? Je le crois.

A partir de la fin des années 70, les températures de surface globales ont grimpé de façon plutôt abrupte jusqu'à un nouveau sommet en 1981. Depuis lors, les températures sont restées près de ce niveau plus élevé. La plupart des modèles climatiques indiquent que cela va accélérer la circulation de Hadley, qui est le moteur du mouvement vers le haut à travers la tropopause tropicale. Ce mouvement accéléré sans apport de chaleur supplémentaire dans la stratosphère pour accélérer le réchauffe-

ment de l'air, fera en sorte que ce flot ascendant se déplacera horizontalement, directement vers les pôles, d'où il retournera à la troposphère. Un tel courant chassera l'ozone de la basse stratosphère où, on l'a remarqué, surviennent les plus fortes baisses de la concentration d'ozone.

Durant ce même laps de temps, il y a eu une augmentation inexplicable dans la concentration de l'ozone dans la troposphère de l'hémisphère nord. C'est ce à quoi l'on se serait attendu, si le changement de circulation que je viens de proposer était arrivé.

On n'a pas observé d'augmentation similaire de l'ozone dans l'hémisphère sud et ne devrait pas être attendue, pour autant que le trou d'ozone de l'antarctique apparaît à chaque printemps.

Peut-être que cela mène ma proposition trop loin, mais notons que l'augmentation de l'ozone total dans les années 60 est survenue en fait juste après le refroidissement quelque peu brutal des températures de surface de l'hémisphère nord entre 1958 et 1963, ce qui a pu conduire à ralentir l'évacuation de l'ozone hors de la basse stratosphère et à des bouleversements plus profonds de la stratosphère. Comme nous l'avons indiqué, lors de réchauffements stratosphériques soudains, ces profonds bouleversements tendent à accroître l'épaisseur de la couche d'ozone dans l'atmosphère.

Incongruités dans la saga de l'ozone

Il y a un certain nombre d'incongruités qui font ressortir le fait qu'il ne s'agit pas, à strictement parler, d'une controverse scientifique à résoudre seulement sur une base scientifique.

Voici quelques unes des incongruités qui m'ont le plus troublé :

1) Les bénéfiques à tirer des UV, c'est-à-dire les maladies résultant d'une trop faible exposition aux UV, ont été méthodiquement ignorées.

S'il s'agissait d'une discussion scientifique purement objective, pourquoi n'avons-nous pratiquement pas entendu parler du rachitisme, de l'ostéomalacie et des propriétés germicides des UV ?

2) Les importantes variations naturelles, selon la latitude et sur le long terme de la quantité d'ozone ont aussi été ignorées.

Le minimum en ozone de 1985-1986 était comparable à celui survenu plus tôt en 1961. Lorsque les UV solaires sont au plus fort et que nous avons alors besoin le plus de protection, c'est alors que la couche d'ozone est la plus ténue. C'est seulement depuis le milieu des années 80, et seulement au-delà de 60 degrés de latitude sud, que nous avons détecté des colonnes d'ozone aussi minces ou même plus minces que celles des tropiques.

Aux latitudes plus élevées, mêmes des couches d'ozone aussi minces procurent plus de protection qu'elles ne le font dans les tropiques, à cause de l'inclinaison plus grande du soleil et de la plus grande distance parcourue à travers la couche d'ozone. Un amincissement beaucoup plus important de la couche d'ozone que ce qui a été observé jusqu'à maintenant serait nécessaire avant qu'une région ne reçoive des UV d'une puissance à laquelle on a survécu confortablement, estime-t-on, à l'équateur depuis des millions d'années.

Souvenez-vous qu'en termes d'incidence de cancer de la peau, une réduction de 1 % de la couche d'ozone est l'équivalent d'un déplacement de 20 km vers l'équateur. Pourquoi cette simple équivalence, grâce à laquelle le public en général pourrait évaluer le sérieux du problème sur l'ozone, a-t-elle été étouffée dans presque tous les reportages médiatiques et les articles scientifiques portant sur l'ozone stratosphérique, et ce pendant presque 20 ans ? (voir Dotto et Schiff 1977, note de la p 283).

3) C'est au-dessus de l'équateur que l'épaisseur de la colonne d'ozone est presque entièrement contrôlée par la seule chimie, c'est-à-dire qu'elle est le moins influencée par le trans-

port de l'air. Toutes les études réalisées jusqu'à ce jour ont noté l'absence d'une tendance à long terme dans l'épaisseur de la colonne d'ozone près de l'équateur. Or, selon les figures 5 et 6, on observe qu'il y a eu des baisses de concentration d'ozone au-dessus de l'équateur, à 40 km et à 25 km d'altitude. Que se passe-t-il donc ici ?

4) Rappelons-nous des premières prédictions sur les graves conséquences à attendre si l'on continuait d'utiliser les CFC jusqu'à ce que la situation atteigne un équilibre dans 75 à 100 ans ? Cette prédiction annonçait qu'on aboutirait à une diminution de 5 % dans l'épaisseur moyenne globale de la couche d'ozone. Eh bien, en 1993, on mesura que l'épaisseur moyenne globale de la couche d'ozone avait baissé « de 5 % en dessous de la moyenne historique » (Herman et Larko, 1994). Mais est-ce que quelqu'un a pu observer l'une ou l'autre des conséquences néfastes que cela devait provoquer ?

5) Dans des expériences où l'on fait croître des plantes avec des niveaux différents d'exposition aux UV, il est difficile de maintenir un rapport fixe ou même naturel de flux UV par rapport au flux total de lumière. Pour résoudre ce problème, on a élaboré un système permettant de suspendre des cuvettes au-dessus des plantes, une remplie d'ozone, qui absorbe une partie des UV solaires, et une remplie d'air qui ne le fait pas. La parcelle recevant des UV atténués tient alors lieu de contrôle et celle qui reçoit un niveau presque normal d'UV est considérée comme la parcelle perturbée.

« Dans une telle étude (simulant une réduction de 10 % en ozone), la hauteur de la plante, la surface des feuilles, et le poids sec des graines de tournesol, de maïs et de seigle furent réduits de façon significative », selon un rapport du programme environnement des Nations Unies (1991, p28). Cela, bien sûr, signifie que toutes ces mesures portant sur la croissance de la plante étaient plus grandes lorsque le niveau naturel d'UV était réduit — autrement dit, le dommage détecté fut causé par des niveaux ordinaires,

normaux d'UV, mais fut décrit comme provenant de niveaux « renforcés » en UV ;

C'est peut-être une méthode parfaitement valable pour mener à bien des expériences, mais rapportées comme elles le furent, cela donne une image déformée au public. Le public garde l'impression qu'aucun dommage ne survient avec des niveaux courants d'UV ;

6) Si vous pensez que je suis le seul à être désorienté, laissez-moi citer quelques extraits récents de Jim Anderson, le scientifique de l'université Harvard qui est au cœur du problème sur l'ozone et devrait savoir ce qui s'y passe (Shell 1994) :

« L'amincissement de la couche d'ozone au-dessus d'autres parties de la terre s'accélère, et nous ne comprenons pas pourquoi, et nous ne savons pas à quelle vitesse. Nous ne savons pas quels facteurs contrôlent le mouvement de l'ozone dans la stratosphère. Nous ne savons pas quel pourcentage de l'amincissement est dû à la dynamique naturelle de l'atmosphère et quel autre est dû à la destruction de l'ozone par des produits chimiques fait par l'homme. Nous ne savons pas grand chose, en fait... Nous avons confondu des modèles informatisés de l'atmosphère avec la réalité. Nous faisons de grandes extrapolations en ne nous basant que sur des modèles, et les modèles sont souvent erronés. »

J'aimerais réitérer pour terminer la citation du Dr Robert Watson de la NASA, organisateur et directeur de l'Ozone Trends Panel, et maintenant directeur adjoint de l'Office of Science and Technology Policy de la Maison Blanche : « Nos modèles sur l'ozone ne prédisent pas le fait que l'ozone ait pu décroître comme il l'a fait au-dessus de l'hémisphère nord au cours des 17 dernières années. Nos modèles ne font pas un bon travail, au point où l'on devrait dire qu'ils sous-estiment les diminutions futures ». (Kerr 1988).

Il est clair que ces scientifiques ne comprennent pas ce qui se passe. Mais, d'une façon très anti-scientifique, ils prétendent que tout cela est dû à l'influence de l'homme et que nous devrions changer notre façon d'agir. ■

Références

- J.K. Angel, « On the Relation between Atmospheric Ozone and Sunspot Number », *Journal of Climate*, Vol.2, pp.1404-1416, 1989.
- Richard Elliot Benedick, *Ozone Diplomacy*, Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1991.
- G. Brasseur, « Long Term Effect on the Ozone Layer of Nitrogen Oxides Produced by Thermonuclear Explosions in Atmosphere », *Annales de Géophysique*, Vol.34, pp. 301-306, 1978.
- Hugh W. Ellsaesser, « Should We Trust Models or Observations ? », *Atmospheric Environment*, Vol.16, N°2, pp.197-205, 1982.
- Hugh W. Ellsaesser, « Ozone Destruction by Catalysis : Credibility of the Threat », *Atmospheric Environment*, Vol.12, pp.1849-1856, 1978.
- Environmental Protection Agency, *Assessing the Risks of Traces Gases That Can Modify the Stratosphere*, EPA 400/1-87/001, décembre 1987.
- Environmental Protection Agency, « Protection of Stratospheric Ozone ; Advance Notice of Proposed Rulemaking », *Federal Register*, Vol.53, N°156, p.30604, 12 août 1988.
- J.C. Farman, B.G. Gardiner, et J.D. Shanklin, « Large Losses of Total Ozone in Antarctica Reveal Seasonal ClO_x/NO_x Interaction », *Nature*, Vol.315, pp.207-210, 1985.
- Brian G. Gardiner, « Comparative Morphology of the Vertical Ozone Profile in the Antarctic Spring », *Geophysical Research Letters*, Vol.15, N°8, pp. 901-904, 1988.
- C.F. Garland et F.C. Garland, « Do Sunlight and Vitamin D Reduce the Likelihood of Colon Cancer? », *International Journal of Epidemiology*, Vol.9, N°3, pp.227-231, 1980.
- C.F. Garland et F.C. Garland, E.K. Shaw, G.W. Comstock, K.J. Helsing et E.D. Gorham, « Serum 25-hydroxyvitamin D and Colon Cancer : Eight-year Prospective Study », *The Lancet*, pp.1176-1177, 18 novembre 1989.
- E.D. Gorham, C.F. Garland et F.C. Garland, « Acid Haze Air Pollution and Breast and Colon Cancer Mortality in 20 Canadian Cities », *Canadian Journal of Public Health*, Vol.80, pp.97-100, 1989.
- J.R. Herman et D. Larko, « Low Ozone Amounts during 1992-1993 from Nimbus 7 and Meteor 3 Total Ozone Mapping Spectrometers », *Journal of Geophysical Research*, Vol.99, N°D2, pp.3483-3496, 1994.
- Richard A. Kerr, « Stratospheric Ozone is Decreasing », *Science*, Vol.239, pp.1489-1491, 1988.
- Richard A. Kerr, « New Assaults Seen on Earth's Ozone Shield », *Science*, Vol.255, pp.797-798, 1992.
- H.H. Lamb, *Climate : Present, Past and Future*, Vol.1, Londres, Methuen and Co, 1972.
- Warren E. Leary, « Scientists Say Warm Winter Prevented Arctic Ozone Hole », *The New York Times*, 1er mai 1992.
- T. Mo et A.E.S. Green, « A Climatology of Solar Erythema Dose », *Photochemistry and Photobiology*, Vol.20, pp.483-496, 1974.
- M.J. Molina et F.S. Rowland, « Stratospheric Sink for Chlorofluoromethanes : Chlorine Atom Catalyzed Destruction of Ozone », *Nature*, Vol.249, pp.810-814, 1974.
- National Academy of Sciences, *Environmental Impact of Stratospheric Flight*, Washington, National Academy of Sciences, 1975.
- NASA, Executive Summary of the Ozone Trends Panel Report, communiqué de presse de la NASA, 15 mars 1988a (voir Kerr, 1988).
- NASA, *Present State of Knowledge of the Upper Atmosphere 1988 : An Assessment Report*, NASA Reference Publication 1208, 1988b.
- Ellen Ruppel Shell, « Jim Anderson », *The New York Times Magazine*, pp.36-39, 1994.
- Susan Solomon, « Progress towards a Quantitative Understanding of Antarctic Ozone Depletion », *Nature*, Vol.347, pp.347-354, 1990.
- R. Stolarski, R. Bojkov, C. Zerefos, J. Staehlin et J. Zawodny, « Measured Trends in Stratospheric Ozone », *Science*, Vol.256, pp.342-349, 1992.
- United Nations Environment Program, *Environmental Effects of Ozone Depletion : 1991 Update*, (UNEP, PO Box 30552, Nairobi, Kenya), 1991.
- World Meteorological Organization, *Atmospheric Ozone 1985 ; Assessment of Our Understanding of the Processes Controlling its Present Distribution and Change*, Global Ozone Research and Monitoring Project, Report N°16, (WMO, Genève 20, CH 1211 Suisse), 1986.
- World Meteorological Organization, *Report of the International Ozone Trends Panel 1988*, Global Ozone Research and Monitoring Project, Report N°18, Vols. 1 et 2, (WMO, Genève 20, CH 1211 Suisse), 1988.
- World Meteorological Organization, *Scientific Assessment of Ozone Depletion : 1991*, Global Ozone Research and Monitoring Project, Report N°25, (WMO, Genève 20, CH 1211 Suisse), 1991.