

# 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.*

**A**u 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).

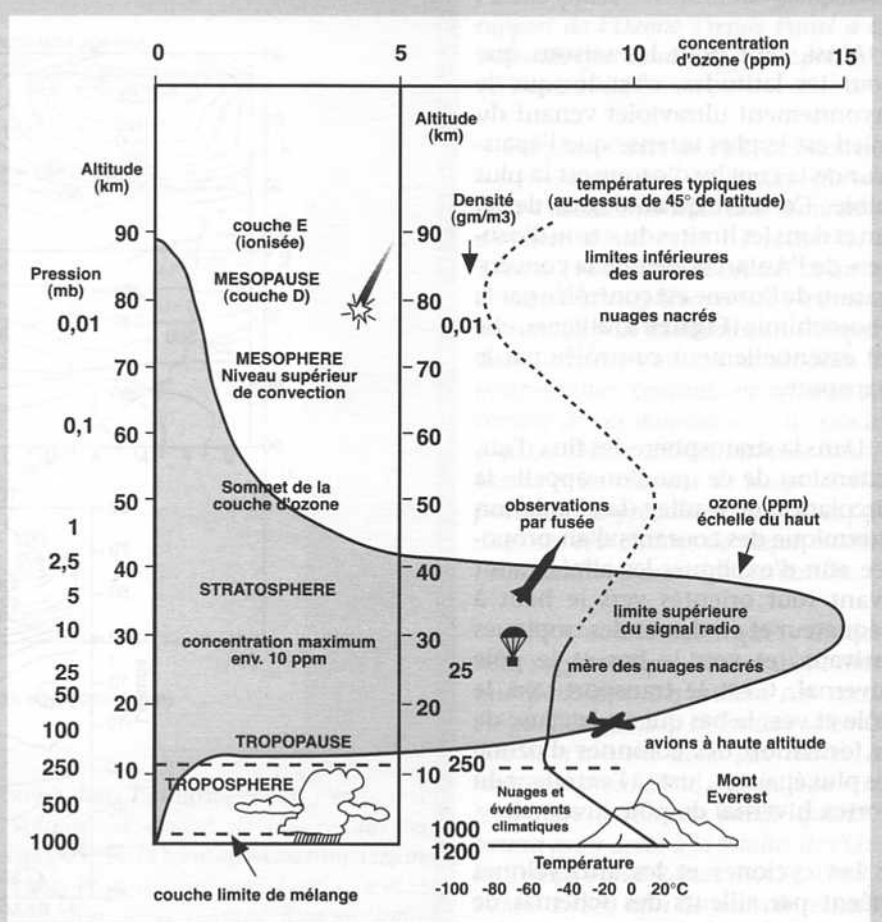
Si un volume d'air s'élève ou s'abaisse sans subir de mélange ou d'action chimique, le rapport de mélange ne change pas, bien que le nombre total de molécules d'air par unité de volume diminue de moitié à chaque fois que l'on monte de 18.000 pieds (6 kilomètres).

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.

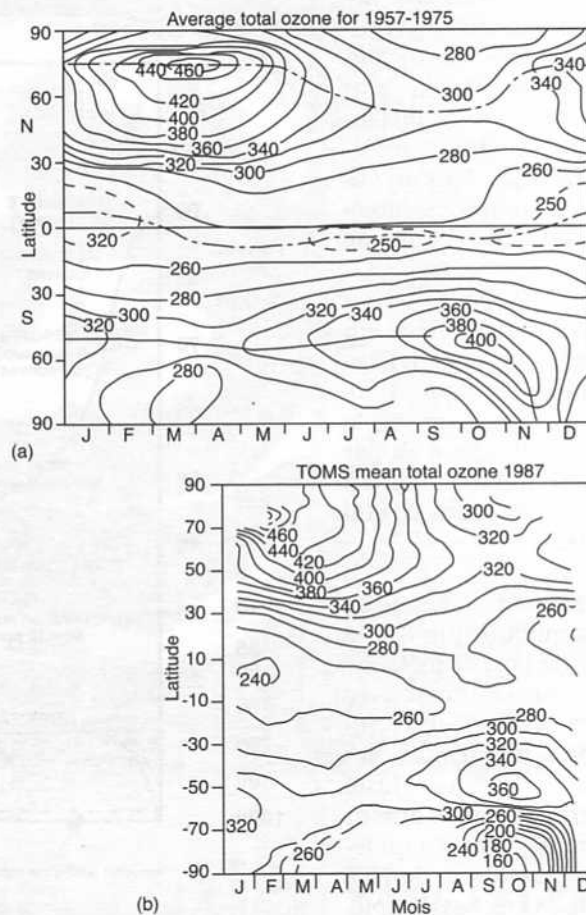
Dans la stratosphère, les flux d'air, extension de ce que l'on appelle la circulation de Hadley (la circulation thermique des courants d'air proposée afin d'expliquer les alizés), sont avant tout orientés vers le haut à l'équateur et au-dessus des tropiques estivaux, et vers le bas et le pôle hivernal. 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.

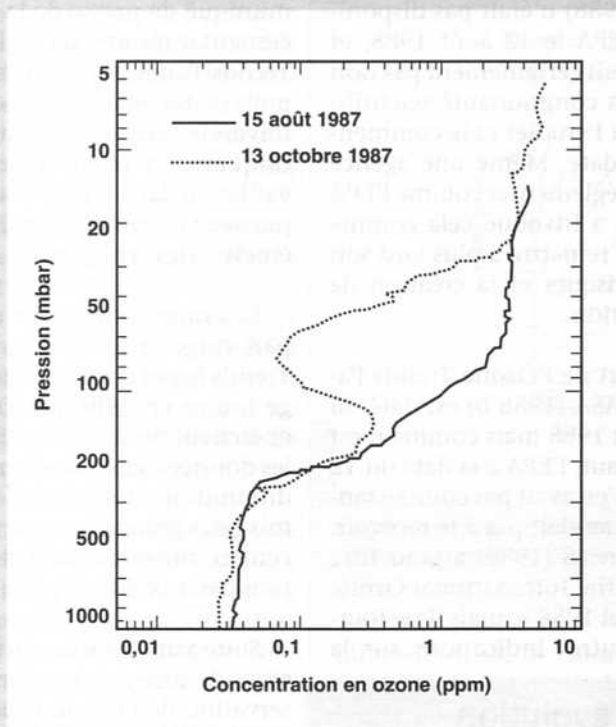
détruire l'ozone et conduire à un accroissement des ultraviolets atteignant la surface, et par conséquent à une augmentation des cancers de la peau. L'inquiétude initiale portait sur la vapeur d'eau provenant des réacteurs des avions de transport supersonique. Il est stupéfiant que personne n'ait alors 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.

