

Amincissement de la couche d'ozone.

30/06/2000

Auteur(s) :

Marc Joubert

Publié par :

Benoît Urgelli

Résumé

La couche d'ozone, son rôle, sa répartition et son devenir.

Table des matières

- [Relation entre UV et couche d'ozone](#)
 - [Répartition mondiale du taux de rayonnement ultraviolet au sol](#)
 - [Répartition mondiale de l'épaisseur de la couche d'ozone stratosphérique](#)
- [Épaisseur de la couche d'ozone](#)
 - [Recherche des variations géographiques d'épaisseur de la couche d'ozone](#)
 - [Recherche des variation temporelles d'épaisseur de la couche d'ozone](#)
 - [Animation 1 : Évolution de la couche d'ozone \(01/09/1997- 18/10/1997\)](#)
 - [Animation 2 : Évolution de la couche d'ozone \(01/09/1995 - 08/12/1995\)](#)
- [Quelles sont les causes de variations de concentration de l'ozone stratosphérique ?](#)
 - [Où en est –on actuellement dans les réponses possibles ?](#)
 - [Inquiétudes futures et disposition prises contre la destruction de la couche d'ozone](#)
 - [Certitudes et incertitudes](#)
 - [D'où viennent les incertitudes ?](#)
 - [Les points à approfondir](#)
 - [Importance des réactions entre gaz et nuages stratosphériques \(chimie hétérogène\)](#)
 - [Le futur](#)
 - [L'engagement de la communauté française](#)
- [Comment se forme et disparaît l'ozone ?](#)
 - [La formation de l'ozone](#)
 - [Dans les hautes couches \(la stratosphère\)](#)
 - [Dans les basses couches de l'atmosphère \(la troposphère\)](#)
 - [La destruction de l'ozone](#)
 - [Dans la stratosphère](#)
 - [Dans la troposphère](#)
- [Glossaire](#)

Relation entre UV et couche d'ozone

Répartition mondiale du taux de rayonnement ultraviolet au sol

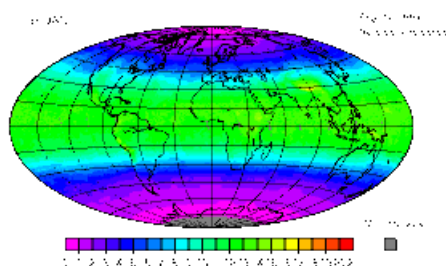


Figure 1. Image satellitale visualisant par une échelle de couleur (unités arbitraires) la densité du rayonnement ultraviolet reçu au sol.

Que représente l'échelle ? Expliquer la répartition des UV.

Répartition mondiale de l'épaisseur de la couche d'ozone stratosphérique

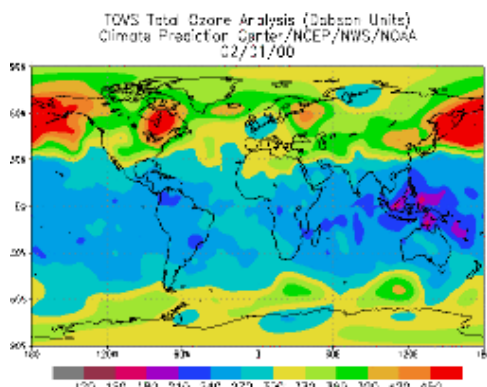


Figure 2. Image satellitale visualisant par une échelle de couleur (unités arbitraires) la concentration d'ozone stratosphérique.

Que représente l'échelle ? En comparant les 2 images, expliquer la relations entre les 2 observations ?

Épaisseur de la couche d'ozone

Recherche des variations géographiques d'épaisseur de la couche d'ozone

L'épaisseur de la couche d'ozone stratosphérique se visualise au moyen d'images satellitales dont les couleurs correspondent à des unités de concentration d'ozone. De telles images sont disponibles sur le site du [Climate Prediction Center](#). Analysez en particulier les documents suivants qui en sont extraits.

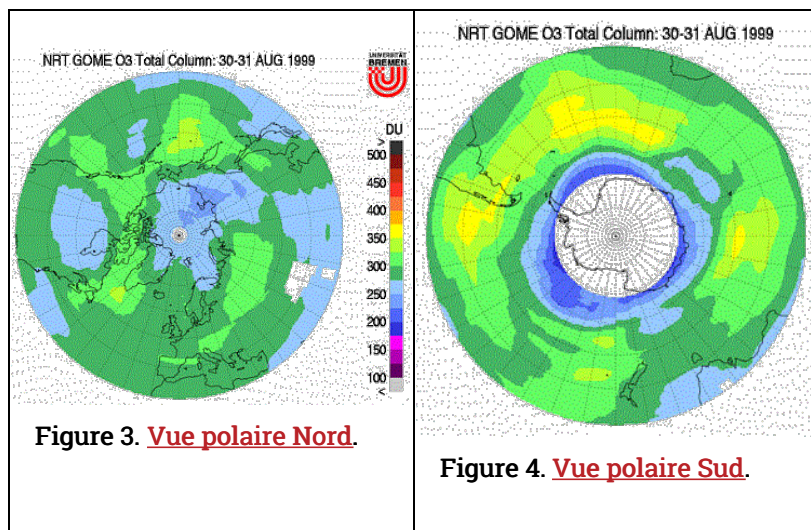
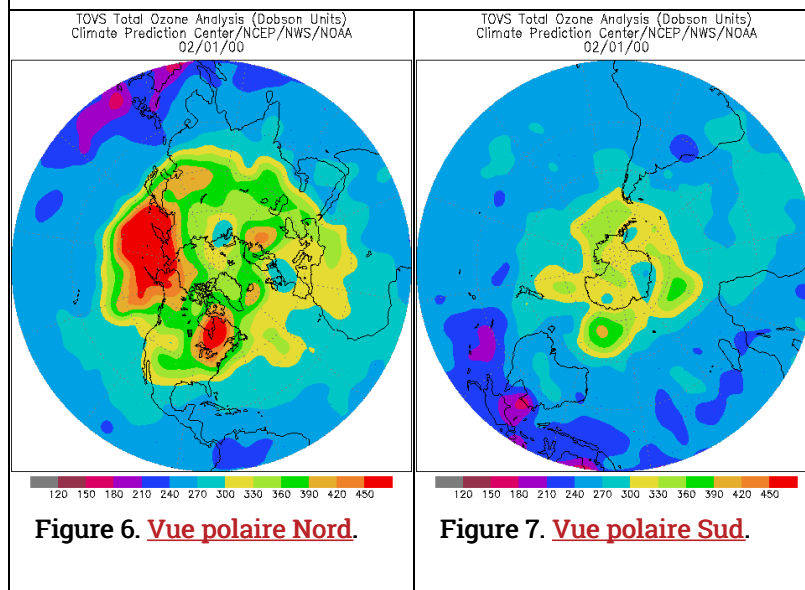
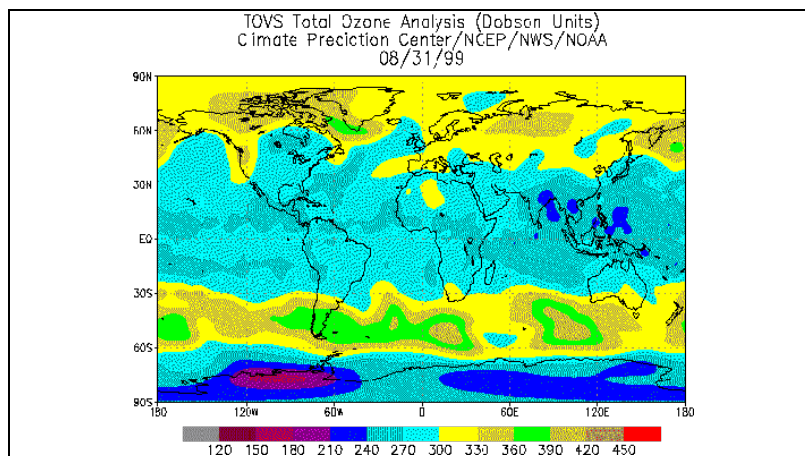


Figure 3. Vue polaire Nord.

Figure 4. Vue polaire Sud.

Sur les vues polaires retrouver les continents et les océans. Dire où sont les anomalies.

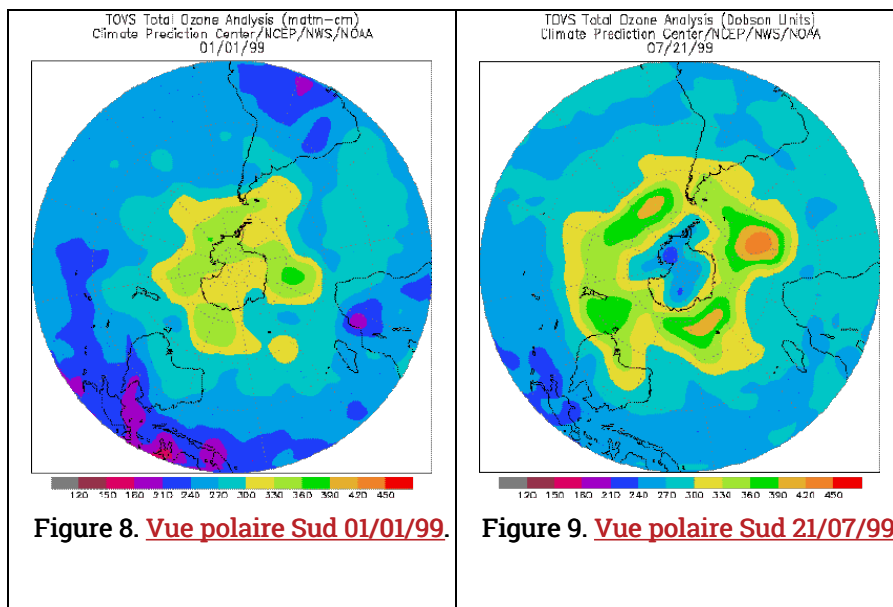


Constate-t-on des variations de concentration de l'ozone dans la stratosphère avec la position géographique (longitude, latitude, océan-continent, etc.) ?

Recherche des variation temporelles d'épaisseur de la couche d'ozone

Les nombreuses images satellitales proposées par le Climate Prediction Center permettent de suivre l'évolution des concentrations d'ozone stratosphérique au fil des jours, des saisons, des années...

Voici deux images représentant les quantités relatives de l'ozone dans la stratosphère au dessus du pôle Sud, mesurées le 1er janvier 99 et le 21 juillet 99. L'échelle des couleurs (unités arbitraires) indique les concentrations d'ozone stratosphérique...



Comparer les 2 images. Repérer les zones de concentrations minimales. Indiquer les variations de concentration d'ozone en Antarctique entre janvier et juillet. Émettre des hypothèses pour expliquer ces variations dans le temps.

Animation 1 : Évolution de la couche d'ozone (01/09/1997- 18/10/1997)

Cette animation illustre l'évolution de la couche d'ozone du 01 septembre 1997 au 18 octobre 1997. Attention la date est inscrite de façon anglo-saxonne : du 09/01/97 au 10/18/97, les mois et les jours sont inversés. Pour relancer l'animation cliquer sur Actualiser du navigateur.

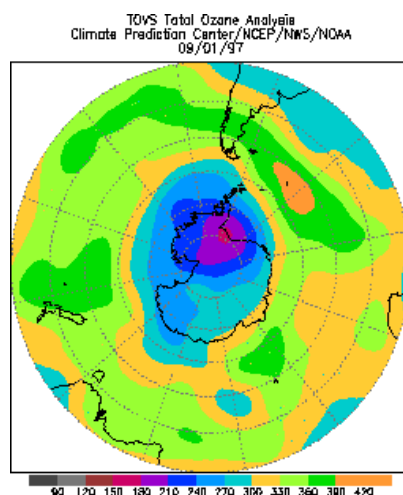


Figure 10. [Évolution de la couche d'ozone du 01 septembre 1997 au 18 octobre 1997.](#)

Quelle est la vue observée ? Quelle est l'évolution au long de cette période ? Comment expliquer les mouvements observés ?

Animation 2 : Évolution de la couche d'ozone (01/09/1995 - 08/12/1995)

Cette animation illustre l'évolution de la couche d'ozone du 01 septembre 1995 au 08 décembre 1995. Attention la date est inscrite de façon anglo-saxonne : du 09/01/95 au 12/08/95, les mois et les jours sont inversés.

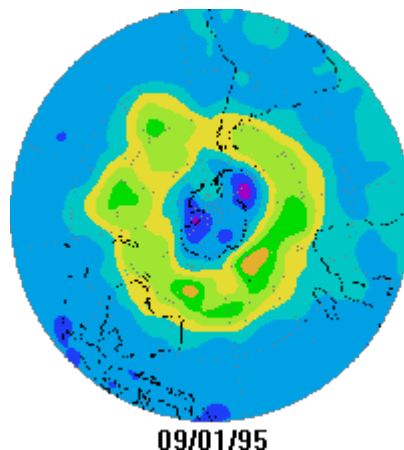


Figure 11. Évolution de la couche d'ozone du 01 septembre 1995 au 08 décembre 1995.

Quelle est la vue observée ? Quelle est l'évolution au long de cette période ? Comment expliquer les mouvements observés ?

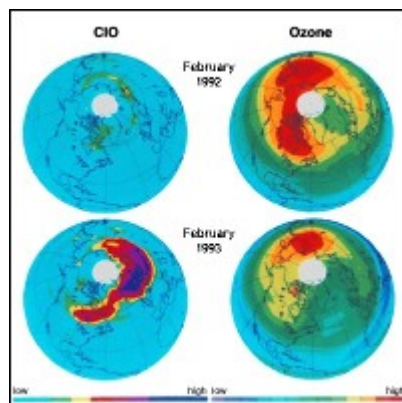
Quelles sont les causes de variations de concentration de l'ozone stratosphérique ?

Plusieurs théories ont été avancées pour expliquer la formation du trou d'ozone :

- hypothèse météorologique sur la circulation de l'air atmosphérique ;
- hypothèse liée à l'activité solaire ;
- hypothèse humaine suite aux activités industrielles.

Où en est –on actuellement dans les réponses possibles ?

Les dérivés chlorés ou **CFC** (CIO en anglais). Voici un document mettant en parallèle les émissions de CFC et la concentration d'ozone stratosphérique.



Source - © 1993 NOAA

Figure 12. Émission de CFC et concentration d'ozone stratosphérique.

Comparer les images puis proposer une hypothèse quand à l'action des **CFC** sur l'ozone. Cette hypothèse est-elle vérifiée ? voir [glossaire](#).

Inquiétudes futures et disposition prises contre la destruction de la couche d'ozone

Certitudes et incertitudes

Aujourd'hui la responsabilité des émissions des composés organo-halogènes liées aux activités humaines sur les diminutions observées de la couche d'ozone stratosphérique doit être considérée comme un fait scientifique établi,

résultant d'un large consensus au sein de la communauté scientifique internationale. De nombreuses incertitudes demeurent cependant sur notre compréhension quantitative des processus impliqués dans les équilibres stratosphériques. Celles-ci limitent fortement notre capacité à prévoir l'évolution future de la couche d'ozone, et ce d'autant plus qu'au fur et à mesure que nous identifions et comprenons les mécanismes mis en jeu, l'atmosphère terrestre se modifie sous l'effet permanent des perturbations anthropiques. De plus, le problème se trouve compliqué par les interactions nombreuses entre l'atmosphère, l'océan et la biosphère qui conduisent à un couplage étroit entre les différents problèmes d'environnement global identifiés aujourd'hui, à savoir :

- effet de serre additionnel ;
- diminution de la couche d'ozone stratosphérique ;
- augmentation des propriétés oxydantes de la troposphère.

D'où viennent les incertitudes ?

Les principales incertitudes résultent :

- de la difficulté à quantifier précisément la répartition spatiale et temporelle d'un certain nombre de constituants (vapeur d'eau, oxydes d'azote), en particulier dans les régions tropicales ;
- de la connaissance encore imprécise des mécanismes physico-chimiques qui régissent l'équilibre de l'ozone dans la basse stratosphère ;
- d'une description encore insuffisante des couplages entre dynamique et chimie en particulier aux échelles régionales et locales.

Toutes ces incertitudes affectent considérablement notre capacité de prédiction concernant l'évolution future de la couche d'ozone et les conséquences potentielles sur le climat, la santé humaine et la biosphère.

Les points à approfondir

Pour prédire aujourd'hui avec quelques chances de succès cette évolution future, il faudrait au minimum pouvoir quantifier de façon précise :

- les processus de chimie hétérogène ;
- les processus microphysiques de formation des nuages polaires ;
- le rôle des aérosols en suspension autour de la Terre dans la basse stratosphère ;
- les processus d'échanges de masse d'air entre la stratosphère et la troposphère, compte-tenu du fait que la zone d'altitude sensible est aujourd'hui comprise entre 15 et 25 kilomètres.

Malgré l'ampleur des recherches expérimentales et l'amélioration constante des modèles de simulation numérique, nous sommes encore loin du compte. Ainsi, si la relation directe de cause à effet entre le chlore d'origine anthropique et l'amincissement de la couche d'ozone antarctique est aujourd'hui démontrée, les diminutions d'ozone observées aux latitudes moyennes des deux hémisphères ne sont pas encore expliquées quantitativement.

Importance des réactions entre gaz et nuages stratosphériques (chimie hétérogène)

Les processus de chimie hétérogène qui doivent aujourd'hui être pris en compte dans la chimie de la basse stratosphère, peuvent en effet contribuer de différentes façons à la destruction de la couche d'ozone. Aux diminutions d'ozone générées par la présence de chlore actif et le renforcement des cycles destructeurs des constituants hydrogènes dans la basse stratosphère, s'ajoutent celles liées au transport de masses d'air venant des régions polaires et ayant subi lors de leur passage dans les nuages stratosphériques polaires des réductions locales des concentrations d'ozone, ou une activation accrue des constituants détruisant l'ozone. S'il est donc généralement admis aujourd'hui que les diminutions à long terme de la couche d'ozone dans les régions de moyenne latitude sont directement liées à des mécanismes chimiques impliquant le chlore d'origine anthropique, l'importance relative des différents mécanismes susceptibles d'expliquer cette évolution reste difficile à quantifier précisément.

Le futur

Si les CFC sont aujourd'hui définitivement supprimés, une grande incertitude demeure en ce qui concerne la date à laquelle le système stratosphérique, largement perturbé, retrouvera un équilibre qui sera probablement différent de celui des années pré-industrielles. En tout état de cause, ce retour à un équilibre de la stratosphère indépendant du contenu en chlore, ne se fera pas avant la deuxième partie du siècle prochain, au delà de l'année 2050.

La stratosphère nous réserve peut-être encore quelques surprises, que seul un effort de recherche maintenu pourra nous permettre d'identifier et de comprendre à temps. Il importe en effet de souligner que dans les problèmes d'environnement, l'avancée des connaissances, par les découvertes nouvelles et la complexité croissante qu'elle implique, ne conduit pas nécessairement à une réduction des marges d'incertitude pour la prise de décision économique et politique.

L'engagement de la communauté française

C'est dans cette perspective d'un effort soutenu de recherche, que la communauté française s'investit fortement à court et moyen terme dans plusieurs projets d'envergure internationale qui couvrent l'ensemble des méthodes mises en œuvre pour comprendre et prédire le comportement de la couche d'ozone stratosphérique. Elle participe ainsi :

- à l'effort d'implantation d'observatoires permanents de mesure de l'ozone et des variables stratosphériques associées, dans le cadre notamment du réseau NDSC (*Network for Detection of Stratospheric Change*) avec les stations de l'observatoire de Haute-Provence, de La Réunion, de Dumont d'Urville et d'Alomar en Norvège ;
- à la campagne coordonnée Theseo (1998-1999) organisée au niveau européen dans la suite des expériences Easoe et Sesame d'étude de l'ozone dans les régions arctiques et de moyenne latitude, grâce à l'effort de développement d'instruments embarqués sur avion (Arat, Mystere 20) et ballon conduit par les agences nationales ;
- à la campagne Strateole (Phase en 1 en 2000) destinée à mieux comprendre les processus dynamiques et chimiques en bordure du vortex antarctique ;
- à l'exploitation des observations spatiales (Poam, Odin, Envisat), avec un effort particulier portant d'une part sur la mise en place de bases de données accessibles à la communauté française (Ether), et d'autre part au développement des méthodes d'assimilation des mesures chimiques ;
- au développement des modèles de simulation (CTM- chemical transport models) couplant chimie et dynamique aux différentes échelles (locale, régionale et globale).

D'après G. Mégie, « L'ozone stratosphérique : un problème scientifique d'actualité » Janvier 1998.

Comment se forme et disparaît l'ozone ?

L'ozone peut se former et se détruire à plusieurs niveaux de l'atmosphère selon des processus photochimiques différents. Ces réactions ont cependant un point commun : elles nécessitent des rayonnements solaires.

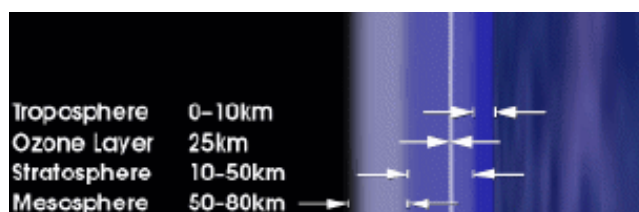


Figure 13. Localisation de la couche d'ozone.

La formation de l'ozone

Dans les hautes couches (la stratosphère)

Dans la stratosphère, le rayonnement solaire ultraviolet court (20 nm), très énergétique, casse différentes molécules. Les fragments se ré-associent pour former des dizaines de composés plus ou moins stables, dont l'ozone.

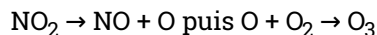
Ainsi, la photo-dissociation de l'oxygène O_2 libère des atomes isolés d'oxygène O qui se combinent avec d'autres

molécules d'oxygène pour former des molécules d'ozone O_3 .

Le bilan peut s'écrire : $3 O_2 \rightarrow 2 O_3$.

Dans les basses couches de l'atmosphère (la troposphère)

Les ultraviolets atteignant le sol ne sont pas assez énergétiques pour permettre directement la photo-dissociation de l'oxygène. Le dioxyde d'azote NO_2 , polluant d'origine automobile, va alors prendre le relais et le bilan, très schématique, s'écrira :



Cette réaction n'est possible qu'en présence d'hydrocarbure qui détourne NO de son rôle de destructeur de l'ozone et peut conduire l'été à des épisodes de pollution photochimique importants au cours desquels les concentrations d'ozone dépassent les seuils acceptables pour la santé et les écosystèmes.

La destruction de l'ozone

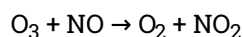
Dans la stratosphère

L'ozone est photo dissocié : $2 O_3 \rightarrow 3 O_2$ sous l'action des radiations solaires UV.

Certains radicaux hydroxylés (OH), azotés (NO) ou chlorés (Cl) tendent à favoriser cette dissociation. Ces radicaux sont produits naturellement et il règne dans la stratosphère un équilibre entre le processus de formation et de destruction de l'ozone. Mais cet équilibre peut être perturbé par l'émission de certains gaz, tels que les CFC (Chlorofluorocarbone) issus des bombes aérosols et des liquides de refroidissement.

Dans la troposphère

L'ozone est consommé par le monoxyde d'azote :



Cette réaction de destruction n'est pas photochimique, elle ne nécessite pas de rayonnement solaire. Elle est particulièrement observée en centre ville où le niveau de monoxyde d'azote est le plus élevé.

D'une façon générale, tant dans la stratosphère que dans la troposphère, les mécanismes et les constituants impliqués dans les réactions de formation et de destruction de l'ozone sont complexes et nombreux. Les équilibres chimiques qui en découlent sont très fragiles. Cette complexité ne permet pas de prévoir une évolution précise des niveaux d'ozone dans l'avenir.

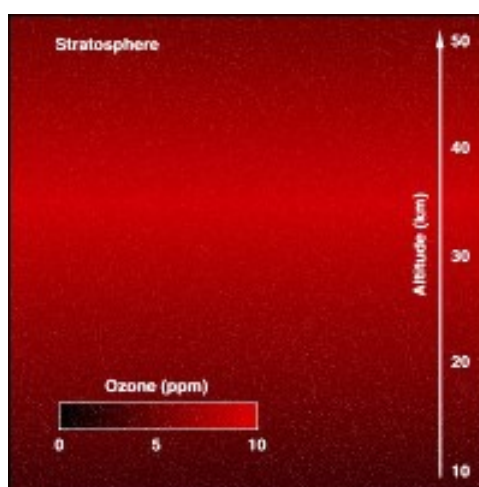


Figure 14. Répartition en ppm de la quantité d'ozone dans l'atmosphère (elle conduit à délimiter la stratosphère).

Glossaire

- CFC

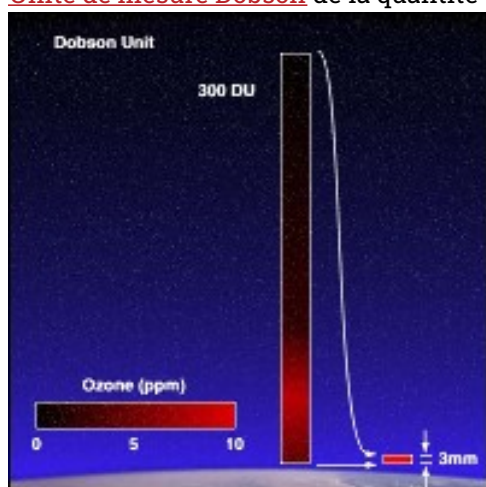
Les Chlorofluorocarbures ou CFC sont des gaz. Ce sont uniquement les activités industrielles qui rejettent

des CFC (le protocole de Montreal (1975) ayant permis d'imposer un processus d'arrêt). Ces CFC sont principalement les CFC-12 (gaz propulseurs des bombes aérosols, qui ne sont plus fabriqués), CFC-11 (réfrigérants et agents gonflants de mousses synthétiques isolantes).

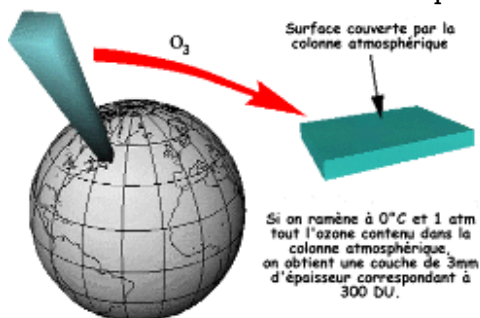
Du fait de leur très longue durée de vie dans la basse atmosphère (50 à 100 ans), les composés organo-halogènes (chlorofluorocarbures, halons) sont les principaux responsables des diminutions observées de la couche d'ozone stratosphérique. Les mesures réglementaires prises dans le cadre du Protocole de Montréal et des amendements de Londres, Copenhague et Vienne, conduisent aujourd'hui à un ralentissement de la croissance de ces composés dans la troposphère, et les observations montrent que la décroissance des concentrations troposphériques s'est amorcée en 1996. Cependant, leur maximum de concentration dans la stratosphère ne sera atteint qu'entre 1998 et 2000, du fait du temps de transport vertical de l'ordre de trois à cinq ans, nécessaire pour que ces constituants atteignent la basse stratosphère. Le contenu en chlore effectif de la stratosphère au cours du siècle prochain continuera donc à être dominé par les émissions des chlorofluorocarbures des années 1960-1990 et le retour au niveau de concentration qui existait antérieurement à l'apparition des phénomènes de destruction de l'ozone dans les régions polaires, ne sera pas effectif avant les années 2040-2050.

- **DU**

Unité de mesure Dobson de la quantité d'ozone dans la colonne atmosphérique.



L'illustration ci-dessous représente une **colonne d'air au-dessus du Canada** dont la base a une superficie de $10^\circ \times 5^\circ$. La quantité d'ozone dans la colonne ainsi définie est mesurée en unités Dobson. Si l'on comprimait tout l'ozone compris dans cette colonne dans les conditions thermodynamiques standard (0°C et 1 atm), on obtiendrait une couche de 3 mm d'épaisseur.



Sachant que cette couche de 3 mm correspond à 300 Unités Dobson (DU), 1 DU correspond donc à une couche d'ozone de 0,01 mm d'épaisseur.

Le spectromètre Dobson est l'instrument de mesure de la quantité d'ozone depuis la surface terrestre. Il mesure l'intensité du rayonnement solaire UV au sol pour quatre longueurs d'onde différentes dont deux seulement sont absorbées par l'ozone.

- **Ozone**

Gaz présent dans les hautes et basses couches de l'atmosphère (stratosphère et troposphère). Il est composé de trois molécules d'oxygène : O_3 . L'ozone absorbe les UV.

- **UV**

Rayon ultraviolet, radiation électromagnétique de longueur d'onde à la limite violette du spectre visible. La gamme de l'ultraviolet s'étend de 0,4 à 0,1 mm. La propriété principale des UV est de favoriser les réactions photochimiques. Les UV ont un fort pouvoir ionisant : cette propriété permet d'en mesurer l'intensité. Ces radiation ont en outre un fort pouvoir stérilisant et bactéricide, d'où leur utilisation dans diverses thérapies.

Le spectre des UV solaires s'étend de 0,25 à 0,36 mm, la bande 0,31-0,36 mm, dite bande A, favorise le bronzage alors que les bandes B et C (respectivement 0,28-0,31 mm et 0,25-0,28 mm,) provoquent des érythèmes ou coups de soleil.

Les UV sont absorbés par l'ozone.