



## L'ozone stratosphérique

Marie-Lise Chanin

### I - Questions les plus fréquentes

#### Qu'est-ce que l'ozone et où se situe-t-il dans l'atmosphère ?

L'ozone est un gaz qui est naturellement présent dans l'atmosphère. La molécule d'ozone est formée de 3 atomes d'oxygène et elle est représentée par la dénomination chimique  $O_3$ . La plus grande quantité d'ozone (90%) se situe dans la stratosphère, c'est-à-dire entre 10-16 et 50 km d'altitude où il représente au plus 10 millièmes de la concentration atmosphérique. C'est à cette fraction de l'ozone que l'on se réfère quand on parle de « couche d'ozone » et c'est de celui-ci dont on parlera ci-dessous. Le reste de l'ozone (10%) se situe dans la troposphère, c'est-à-dire entre la surface du sol et environ 10 à 16km, et sa présence contribue à la pollution de l'air (voir figure 1).

#### Pourquoi distinguer le problème de l'ozone de celui des autres gaz présents dans l'atmosphère ?

Le maintien de la couche d'ozone dans la stratosphère est essentiel puisque c'est cette molécule qui assure la protection de la vie à la surface de la Terre en filtrant le rayonnement ultraviolet nocif pour les êtres vivants et les végétaux. Il faut se rappeler que le développement de la vie sur notre planète a été rendu possible grâce à la formation autour de celle-ci de la molécule d'ozone ( $O_3$ ) par dissociation de la molécule d'oxygène moléculaire ( $O_2$ ) sous l'action du rayonnement ultraviolet solaire (voir figure 2). L'épaisseur totale de la couche d'ozone qui conditionne la pénétration de l'ultraviolet varie en fonction de la latitude et de la saison, mais sa valeur moyenne pendant les dernières 1970 années où de nombreuses mesures sont disponibles, a été remarquablement stable... jusqu'aux années 1970-1980.

#### Pourquoi parle-t-on du « bon » et du « mauvais » ozone ?

Comme nous venons de le dire, l'ozone stratosphérique filtre le rayonnement ultraviolet et permet la vie sur terre, c'est le « bon » ozone. Mais il y a aussi une formation d'ozone au niveau du sol, non pas par le même processus puisque le rayonnement ultraviolet le plus énergétique ne pénètre pas jusqu'au sol, mais par réactions chimiques à partir de polluants émis par les activités humaines, en particulier les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone et les hydrocarbures. Cet ozone est un oxydant puissant et en concentration importante, il a des effets nocifs sur la santé, notamment en irritant les voies respiratoires, et sur les écosystèmes en réduisant la croissance et le rendement des cultures. D'où son qualificatif de « mauvais » ozone. (Voir la fiche « Air »)

#### Pourquoi la couche d'ozone a-t-elle été menacée ?

Depuis environ 50 ans, l'homme a fabriqué industriellement des composés organiques halogénés, dont les chlorofluorocarbures (CFC) qui sont des molécules synthétiques très stables chimiquement et donc sans danger direct pour les êtres vivants. Pour cette raison, celles-ci ont été utilisées dans de nombreuses applications : réfrigérants (frigorifiques,

climatiseurs), gaz propulseur dans les bombes aérosols, mousses synthétiques, solvants... et ont ainsi joué un rôle très bénéfique pour l'amélioration de notre mode de vie. Mais, du fait de leur très grande stabilité, ces gaz restent dans l'atmosphère pendant des décennies (50 à 100 ans), et ils sont progressivement transportés dans la stratosphère, où, soumis à l'influence du rayonnement ultraviolet solaire, ils sont dissociés et libèrent du chlore qui ont alors la capacité de rentrer dans des cycles de réactions chimiques conduisant à la destruction de l'ozone (voir figure. 3).

### **Où observe-t-on la destruction de la couche d'ozone ?**

Au-delà des faibles diminutions de l'épaisseur de la couche d'ozone qui avaient été prévues et observées depuis la fin des années 1970 dans les régions de moyenne latitude, la découverte du « trou d'ozone » au-dessus du continent antarctique en 1985 a été la première manifestation spectaculaire de l'effet des activités humaines sur les équilibres physicochimiques globaux de l'atmosphère. Dans cette région, la quasi-totalité de l'ozone entre 15 et 20 km se trouve détruite chaque année au printemps et l'épaisseur totale d'ozone est alors diminuée de moitié (voir figure 4). Une diminution de l'ozone se produit également, mais avec une moindre amplitude, au printemps au-dessus de l'Arctique (voir figure 5). La différence de comportement entre les deux régions polaires provient d'une différence dans la circulation atmosphérique qui est plus régulière au-dessus du continent antarctique, et cette circulation maintient dans la stratosphère polaire une température très froide favorable à une forte destruction de l'ozone (voir figure 6).

### **Pourquoi un « trou d'ozone au-dessus de l'Antarctique, alors que les émissions de CFC se font surtout aux latitudes moyennes de l'hémisphère Nord ?**

Bien que les CFC et autres composés halogénés soient surtout émis dans l'hémisphère Nord, ils sont soumis à la circulation atmosphérique à grande échelle lorsqu'ils atteignent la stratosphère. Après une ou deux années dans la troposphère, ils se retrouvent présents à toutes les latitudes, même très loin des régions où ils sont émis, notamment au-dessus de l'Antarctique. Le fait que la température de la stratosphère soit plus froide qu'aux autres latitudes explique l'occurrence chaque hiver et chaque printemps du « trou d'ozone Antarctique » (voir figures 4 et 5).

### **Quelle a été la réaction des scientifiques après la découverte du « trou d'ozone » ?**

Dès l'observation du « trou d'ozone » et son explication scientifique mettant en cause les composés chlorés, tout particulièrement les CFC, des discussions entre scientifiques, industriels et décideurs politiques ont permis de décider des mesures à prendre. Celles-ci ont consisté à proscrire la production et l'usage des CFC, grâce à la mise en place du Protocole de Montréal dès 1987 revu et amendé à plusieurs reprises depuis cette date (voir figure 7). La plupart des pays producteurs et utilisateurs de CFC ont ratifié cet accord et les industriels ont rapidement mis sur le marché des produits de remplacement, ou substituts, beaucoup moins nocifs pour l'ozone. Au fil des ans, le Protocole de Montréal a dû être renforcé pour tenir compte des résultats obtenus, des substituts disponibles et des possibilités des pays à les utiliser. De plus, depuis 1987, les scientifiques ont découvert dans l'atmosphère d'autres substances aussi nocives que le chlore, si ce n'est plus. Il s'agit notamment des composés contenant du brome, comme le bromure de méthyle utilisé pour la culture des fruits et les halons utilisés dans les extincteurs. Le brome est en effet un agent 60 fois plus efficace que le chlore dans les processus de destruction catalytique de l'ozone.

Le résultat du Protocole de Montréal et de ses amendements successifs est un succès : dès la fin des années 1990, on a pu constater la diminution de la quantité de chlore, et plus

récemment de brome dans la stratosphère (voir figure 8). En 2015 la diminution est de l'ordre de 15%. Les prévisions pour le futur de l'ozone dépendent du respect du Protocole et de ses amendements par l'ensemble des pays.

### **La récupération de la couche d'ozone est-elle possible, et à quelle échéance ?**

Le problème de l'ozone n'a pas disparu malgré l'existence du Protocole de Montréal, car les composés chlorés et bromés restent dans l'atmosphère pendant plusieurs décennies, et malheureusement il existe encore des stocks très importants de ces produits qui sont encore utilisés et même fabriqués illégalement dans certaines parties du monde. On vient d'observer pendant l'été 2019 un fort ralentissement dans la diminution de CFC 11 dans l'atmosphère dont l'origine a été située à l'est de la Chine. La cause de cette production de CFC11 n'est pas encore identifiée mais fait l'objet d'intenses investigations dans cette partie du monde.

Mais ces dernières années, on constate cependant, pour la première fois depuis 30 ans, que l'ozone a cessé de diminuer à moyenne latitude. Malgré les fluctuations et les incertitudes dans les mesures, on a toute raison de croire que la période de récupération a commencé. L'observation d'un trou d'ozone très accentué en Antarctique en septembre 2006 ne doit pas être considéré comme un signe alarmant, car on s'attend à ce type de fluctuations de nature météorologique. D'ailleurs en 2011 un trou d'ozone exceptionnel s'est produit au-dessus de l'Arctique, sous l'effet de conditions météorologiques particulières. (voir figures 9 et 10).

Mais cependant on observe des signes de récupération du trou d'ozone antarctique, malgré les fluctuations. Mais il y a lieu d'être vigilant pour éviter que des substances destructrices ne réapparaissent. Mais le trou d'ozone en Antarctique et les diminutions d'ozone au printemps arctique se manifesteront encore au-delà de la moitié du XXI<sup>e</sup> siècle, avec une variabilité qui rend difficile une prédiction plus précise.

### **La diminution d'ozone a-t-elle des conséquences sur le flux ultraviolet au sol ?**

Étant donné que l'ozone atmosphérique absorbe l'ultraviolet solaire, toute diminution d'ozone (en dehors de toute autre modification de l'atmosphère) doit entraîner une augmentation de la pénétration du flux ultraviolet au niveau du sol dans une proportion à peu près équivalente. Les mesures confirment qu'il en est bien ainsi. Les augmentations les plus évidentes ont été observées au voisinage des pôles. En effet lorsque la destruction d'ozone au-dessus du pôle Sud cesse avec la fin du printemps, les masses d'air au-dessus des régions voisines de l'Antarctique sont pauvres en ozone, et des régions comme le Sud de l'Argentine et du Chili et l'Australie sont alors soumises à des flux ultraviolet dangereux. Le même phénomène se produit mais beaucoup plus faiblement sur l'Europe au printemps.

Si cette diminution de l'épaisseur de la couche d'ozone, aux pôles comme aux moyennes latitudes, s'était amplifiée, le monde entier aurait été soumis aux mêmes effets qu'au voisinage de l'Antarctique. Une telle augmentation de l'ultraviolet aurait présenté pour l'ensemble de la planète des risques importants tant pour l'homme que pour les animaux (cancers de la peau, cataractes...), pour les forêts et les cultures (diminution de la photosynthèse et baisse des rendements). La position de la France est telle que l'impact de la diminution de l'ozone n'y est pas particulièrement critique (voir figure 11).

### **Le « trou d'ozone » joue-t-il un rôle dans le problème du changement climatique ?**

La diminution d'ozone stratosphérique est un problème tout à fait distinct de celui du changement climatique dû à l'augmentation des gaz à effet de serre. Ils diffèrent à la fois quant à leurs causes et quant à leurs conséquences. Cependant les interactions complexes dans l'atmosphère et entre l'atmosphère et l'océan sont telles que des influences sont inévitables

entre les deux phénomènes et qu'il y a de nombreuses interactions entre les deux. Mais il convient dans une première approche de traiter séparément les deux problèmes.

On ne mentionnera ici trois domaines d'interaction connus à ce jour :

- La température dans la stratosphère perturbée à la fois par le changement de la concentration d'ozone et des gaz à effet de serre a entraîné un changement de la circulation méridionale dominante dans cette région, circulation dite de Brewer-Dobson. Ces changements sont actuellement pris en compte dans les modèles pour prédire l'évolution de l'ozone au XX<sup>e</sup> siècle et montrent que l'ozone reviendra à la valeur de 1980 vers 2050 et la dépassera éventuellement de 2% ensuite. (Fig. 12).
- les CFC et certains substituts mis au point pour les remplacer (notamment les HFC) sont des puissants gaz à effet de serre. Globalement ils sont responsables d'environ 13 % de l'effet de serre additionnel dû à l'ensemble des gaz à effet de serre depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle (voir figure 13 et fiche Air). Le contrôle de leur production est donc essentiel pour la surveillance des changements climatiques et s'inscrit alors dans le contexte de la Convention relevant du Climat. Un amendement a été apporté au Protocole de Montréal en Janvier 2019, dit Amendement de Rigali, pour limiter et progressivement interdire la production de HFC et ainsi éviter un réchauffement de 0.4°C. A la limite on peut dire que ce problème devient prioritaire et qu'en ce qui concerne la situation de l'ozone stratosphérique, on est sorti de la période où les substances à bannir étaient seulement les composés chlorés et bromés pour lutter actuellement contre les substituts à fort pouvoir de réchauffement global.
- le trou d'ozone Antarctique a affecté le climat de surface de l'océan dans l'Hémisphère sud et les changements des vents de surface ont contribué au réchauffement observé dans la Péninsule Antarctique et au refroidissement sur le haut plateau (phénomène opposé à ce que l'on attendait de l'augmentation des gaz à effet de serre) (figure 15).

### **En conclusion**

À l'échelle de la planète, le problème du maintien de la couche d'ozone stratosphérique qui entoure la Terre devant le danger qui la menaçait a été un excellent exemple de problème d'environnement global. La façon dont il a été abordé, et en grande partie résolu par la communauté scientifique dans les deux dernières décennies peut être considéré comme un modèle à suivre dans d'autres domaines environnementaux. Plusieurs travaux décrivent ce qui se serait produit sans la mise en œuvre du protocole de Montréal. Ils font état d'un monde où le trou d'ozone se serait étendu à l'ensemble du globe et serait devenu permanent vers 2065, avec comme conséquence le doublement du flux UV.

Cependant le problème de la récupération de la couche d'ozone stratosphérique n'est pas résolu pour autant à ce jour, tout d'abord parce que ces substances resteront dans l'atmosphère pendant des décennies étant donné leur stabilité chimique ; surtout parce qu'il existe une grande quantité de CFC encore en circulation, notamment dans les vieux frigidaire et dans des stocks, et il convient donc de ne pas les relâcher dans l'atmosphère, mais de les confier à des centres de récupération qui les détruiront.

## II - Figures et compléments d'information

### L'ozone, constituant de l'atmosphère

L'ozone est un gaz naturellement présent dans l'atmosphère, bien qu'en très faible quantité par rapport aux autres molécules d'azote (78%) et d'oxygène (21%) qui, avec l'addition de quelques gaz rares argon, hélium..., représentent 99% de la composition de l'air. La molécule d'ozone est formée de 3 atomes d'oxygène et elle est représentée par la dénomination chimique  $O_3$  et provient de la dissociation de la molécule d'oxygène moléculaire ( $O_2$ ) par le rayonnement ultraviolet. La plus grande quantité d'ozone (90%) se situe dans la stratosphère, et constitue la « couche d'ozone ». Le reste de l'ozone (10%) se situe dans la troposphère, c'est-à-dire entre la surface du sol et environ 10 à 16km, et notamment très près du sol où sa présence provient de la pollution de l'air. La figure montre clairement en rouge de 15 à 40 km le « bon » ozone (celui qui protège de l'ultraviolet) et du sol à environ 1 à 2 km le « mauvais » ozone (celui qui correspond à la pollution). Le maximum de l'ozone se situe vers 25 km où la concentration d'ozone ne représente qu'environ 5 à 10 millièmes de la concentration atmosphérique.

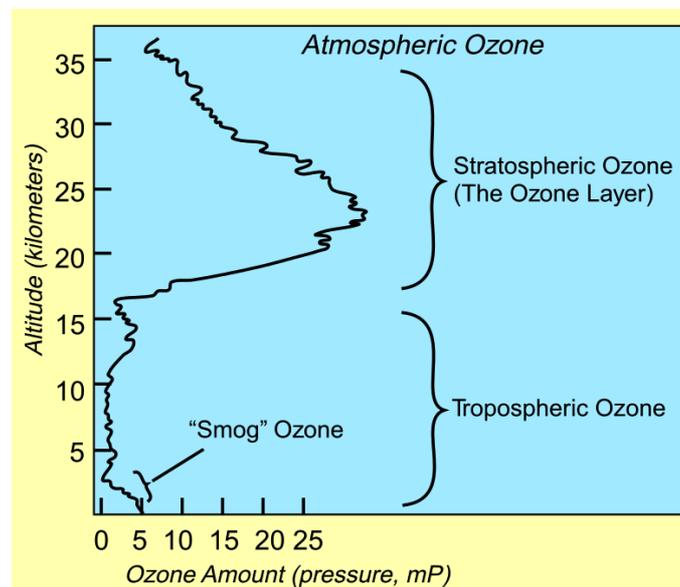


Figure 1. Distribution verticale d'ozone. Dans la stratosphère le maximum d'ozone représente environ 10ppm soit 10 millièmes de la concentration atmosphérique et dans la troposphère en dehors des agglomérations environ 50 ppb, soit 50 millièmes de la concentration atmosphérique.

Malgré sa très faible concentration, l'ozone est essentiel à la vie sur terre puisque sa présence assure la protection de la vie à la surface de la Terre en filtrant le rayonnement ultraviolet nocif pour les êtres vivants et les végétaux. Le développement de la vie sur notre planète a été conditionné par la formation autour de la terre de la molécule d'ozone ( $O_3$ ). En effet, le rayonnement solaire dans l'ultraviolet-B (entre 280 et 315 nm) est partiellement absorbé par la couche d'ozone et ainsi ce rayonnement très énergétique destructeur de l'ADN n'atteint pas la surface. Par contre le rayonnement ultra-violet A (entre 315 et 400 nm) n'est que très faiblement absorbé par l'ozone et parvient jusqu'au sol.

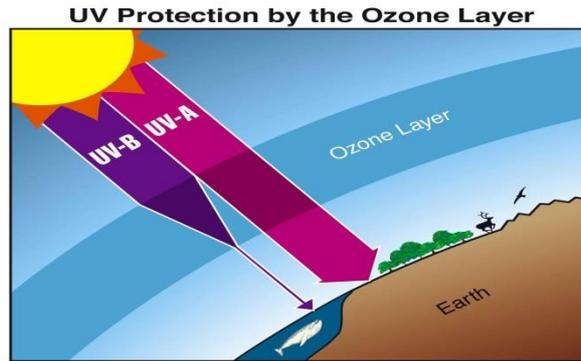


Figure 2 – Le rayonnement solaire dans l’ultraviolet-B (entre 280 et 315 nm) est partiellement absorbée par la couche d’ozone tandis que le rayonnement ultraviolet A (entre 315 et 400 nm) peut atteindre la surface de la terre.

### **Fragilité de la couche d’ozone**

L’épaisseur totale de la couche d’ozone qui conditionne la pénétration de l’ultraviolet varie en fonction de la latitude et de la saison, mais sa valeur moyenne pendant les dernières 1970 années où de nombreuses mesures sont disponibles, a été remarquablement stable et ceci jusqu’aux années 1970-1980. Dans les années 1970 la communauté scientifique s’est inquiétée de l’effet que pourrait avoir sur l’ozone les émissions d’oxydes d’azote et de chlore sur la stabilité de l’ozone. Ce sont ces travaux qui ont valu à Paul Crutzen, Sherwood Rowland et Mario Molina le Prix Nobel de Chimie en 1985. Ces inquiétudes se sont particulièrement manifestées en relation avec le développement de l’avion supersonique Concorde qui devait créer des quantités importantes d’oxydes d’azote dans la stratosphère. Mais en fait les composés les plus dangereux pour l’ozone se sont avérés être les composés organiques halogénés, dont les chlorofluorocarbures (CFC) qui sont des molécules synthétiques très stables chimiquement et donc sans danger direct pour les êtres vivants. C’est d’ailleurs pour cette raison que celles-ci ont été développées et qu’elles ont été utilisées dans de nombreuses applications: réfrigérants (frigorifiques, climatiseurs), gaz propulseur dans les bombes aérosols, mousses synthétiques, solvants... et ont ainsi joué un rôle très bénéfique pour l’amélioration de notre mode de vie. Du fait de leur très grande stabilité, ces gaz restent dans l’atmosphère pendant des décennies (50 à 100 ans), et ils sont progressivement transportés dans la stratosphère, où, soumis à l’influence du rayonnement ultraviolet solaire, ils sont dissociés et libèrent du chlore qui a alors la capacité de rentrer dans des cycles de réactions chimiques catalytiques conduisant à la destruction de l’ozone. La destruction met en jeu deux réactions chimiques, l’une transforme l’oxyde de chlore ClO en atome de chlore Cl qui ultérieurement détruit l’ozone, mais en restituant l’oxyde ClO, ce qui permet au cycle de recommencer un grand nombre de fois. Le chlore joue ainsi un rôle de catalyseur et une très faible quantité de ClO peut détruire un grand nombre de molécules d’ozone, à condition d’être en présence d’oxygène atomique, ce qui est le cas grâce à la décomposition de l’ozone par l’ultraviolet solaire.

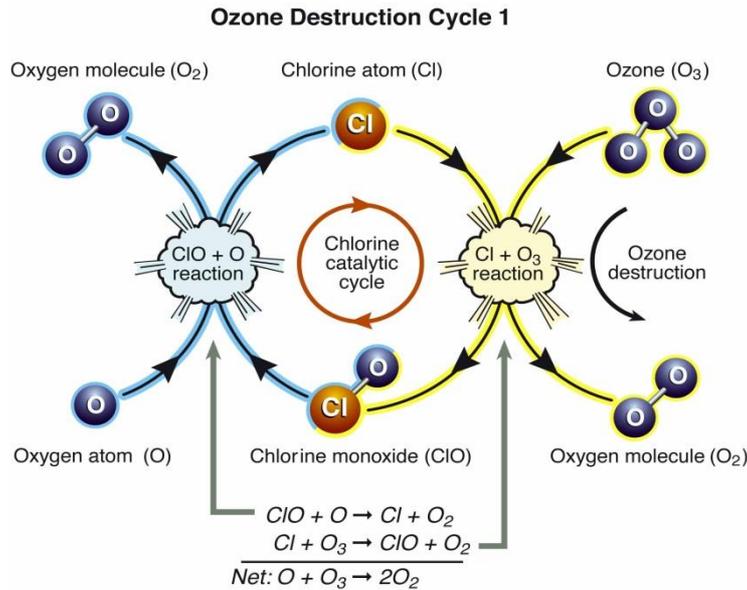
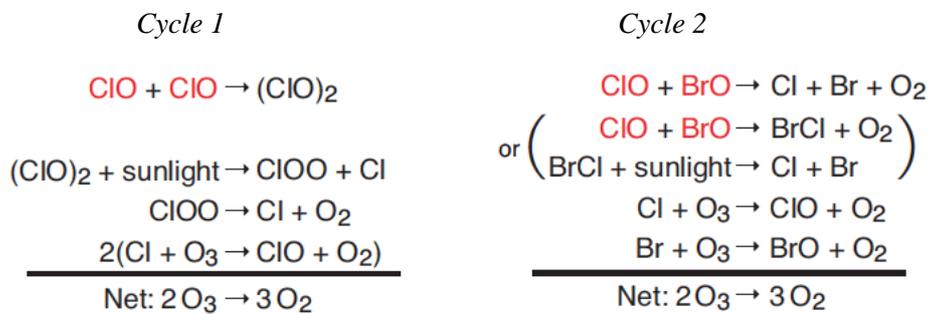


Figure 3 – Cycle de destruction de l’ozone par le chlore.

D’autres formes d’halogènes destructeurs d’ozone ont aussi été émis au cours des récentes décennies dans l’atmosphère sous forme bromure de méthyle utilisé pour la culture des fruits et de halons, composés organiques contenant du brome, qui sont utilisés par exemple comme solvants. Le brome est en effet un agent 60 fois plus efficace que le chlore dans les processus de destruction catalytique de l’ozone. La décomposition des halons conduit à la formation de radicaux bromés, notamment le monoxyde de brome BrO qui joue le même rôle vis à vis de l’ozone que le monoxyde de chlore comme le montre le schéma suivant.



### Destruction d’ozone polaire

La destruction de l’ozone polaire résulte d’une conspiration, a priori improbable, de la mécanique des fluides, de la microphysique et de la chimie. La disparition du rayonnement solaire au-dessus de l’Antarctique en hiver entraîne la formation du vortex polaire, une ceinture de vents d’ouest très intenses qui isole les masses d’air polaires des régions avoisinantes. La stratosphère polaire se refroidit fortement jusqu’à atteindre des températures très basses (inférieures à  $-85^\circ\text{C}$ ), propices à la formation de nuages stratosphériques polaires. À la surface de ces nuages, des réactions chimiques en phase hétérogène transforment les composés chlorés stockant le chlore issu de la dissociation des CFC, peu réactifs vis-à-vis de l’ozone à cette altitude, en composés plus actifs. C’est l’étape d’activation du chlore. Dès la réapparition du soleil au-dessus du pôle au mois d’août, ces composés forment à leur tour du monoxyde de chlore (ClO) qui, sous l’action du rayonnement solaire, initie des cycles catalytiques qui détruisent l’ozone au rythme de plusieurs pour cents par jour, aboutissant à

une diminution à la fin septembre de plus de 60% de la colonne totale d'ozone, avec une disparition quasi complète de l'ozone entre 15 et 20 km, où sa concentration est maximale. Les cycles dominants de destruction d'ozone mettent en jeu le monoxyde de chlore et le monoxyde de brome, comme montré ci-dessus.

### Observation de la destruction de la couche d'ozone

Au-delà des faibles diminutions de l'épaisseur de la couche d'ozone qui avaient été prévues et observées depuis la fin des années 1970 dans les régions de moyenne latitude, la découverte du « trou d'ozone » au-dessus du continent antarctique en 1985 a constitué la première manifestation spectaculaire de l'effet des activités humaines sur les équilibres physicochimiques globaux de l'atmosphère. Dans cette région, la quasi-totalité de l'ozone entre 15 et 20 km se trouve détruite chaque année au printemps et l'épaisseur totale d'ozone est alors diminuée de moitié comme on peut le voir dans la figure 4.

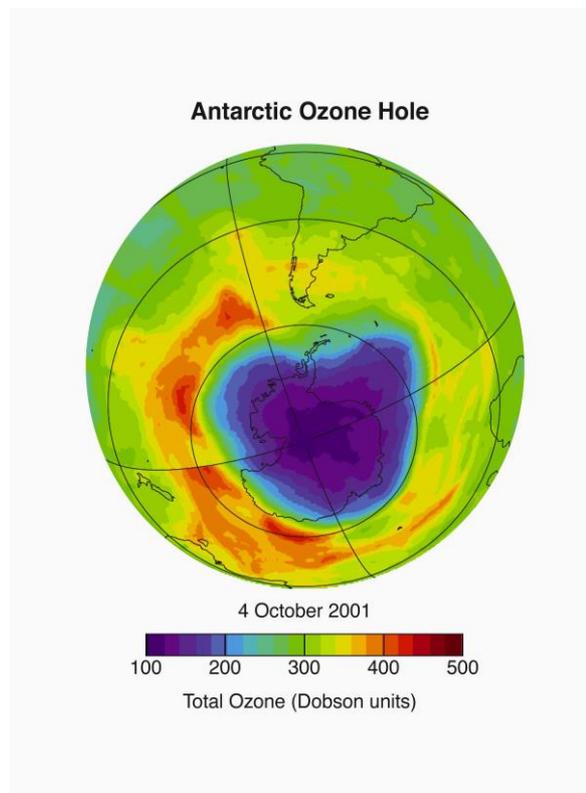


Figure 4 – Exemple de « trou d'ozone » au printemps antarctique en octobre 2001

Une diminution de l'ozone se produit également, mais avec une moindre amplitude, au printemps au-dessus de l'Arctique. La différence de comportement entre les deux régions polaires provient d'une différence dans la circulation atmosphérique qui est plus régulière au-dessus du continent antarctique, et cette circulation maintient dans la stratosphère polaire une température très froide favorable à une forte destruction de l'ozone.

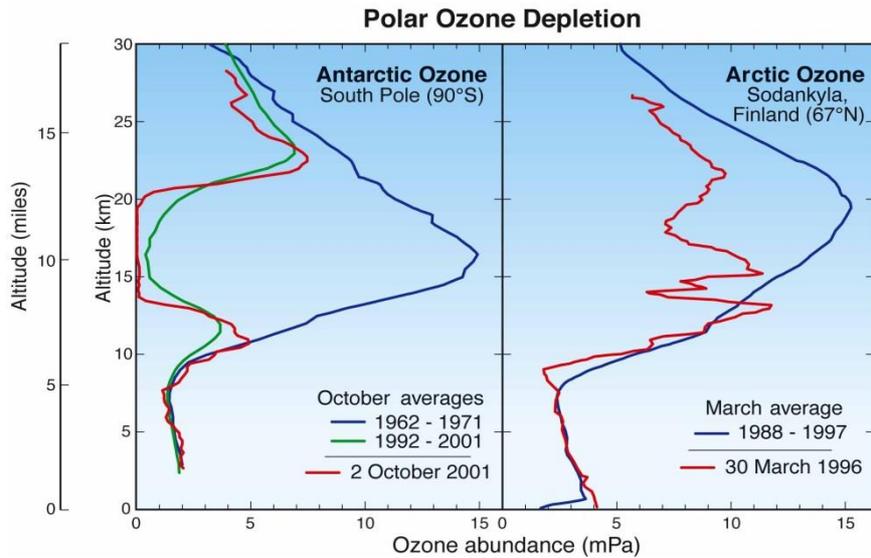


Figure 5 – Comparaison de profils d’ozone obtenus récemment par rapport aux profils moyens obtenus avant l’action des CFC. On observe dans ces exemples que l’ozone est quasi-complètement détruit entre 14 et 20 km au-dessus de l’Antarctique, alors que la destruction observée au-dessus de l’Arctique n’est que partielle. Cette différence est due à la différence de température entre ces deux régions. (L’unité mPa correspond au « milliPascal »).

La stabilité des masses froides au-dessus de l’Antarctique est responsable de cette asymétrie entre les deux hémisphères. Beaucoup ont été surpris que « trou d’ozone » apparaisse au-dessus d’un continent non pollué par les activités humaines, alors que les CFC et autres composés halogénés sont surtout émis dans l’hémisphère Nord. Mais, après leur émission, ils sont soumis à la circulation atmosphérique à grande échelle lorsqu’ils atteignent la stratosphère. Après une ou deux années dans la troposphère, ils sont répartis à toutes les latitudes, même très loin des régions où ils sont émis, et notamment au-dessus de l’Antarctique, là où les températures sont plus favorables à la destruction de la couche d’ozone que dans toute autre région du globe.

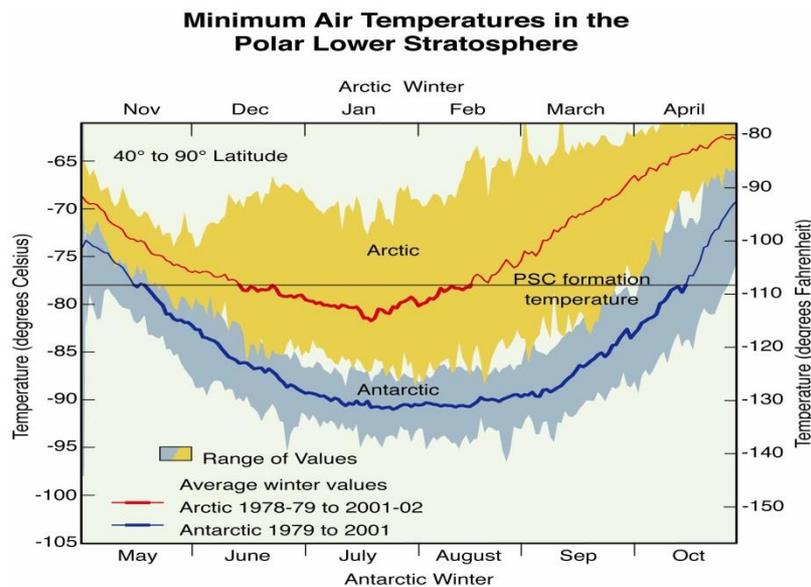


Figure 6 – Variation de la température arctique et antarctique pendant l’hiver.

## Le Protocole de Montréal

Dès l'observation du « trou d'ozone » en 1985, des travaux expérimentaux et théoriques ont été entrepris pour en comprendre la cause. Dès 1987 l'explication scientifique était donnée et elle mettait en cause les composés chlorés, tout particulièrement les CFC. Très rapidement les mesures à prendre ont pu l'être et elles ont conduit à proscrire la production et l'usage des CFC, grâce à la mise en place du Protocole de Montréal dès 1987. La plupart des pays producteurs et utilisateurs de CFC ont ratifié cet accord et les industriels ont rapidement mis sur le marché des produits de remplacement, ou substituts, beaucoup moins nocifs pour l'ozone. Au fil des ans, le Protocole de Montréal a dû être renforcé pour tenir compte des substituts disponibles et des possibilités des pays à les utiliser. Dès la fin des années 1990, on a pu constater la diminution de la quantité de chlore dans la stratosphère.

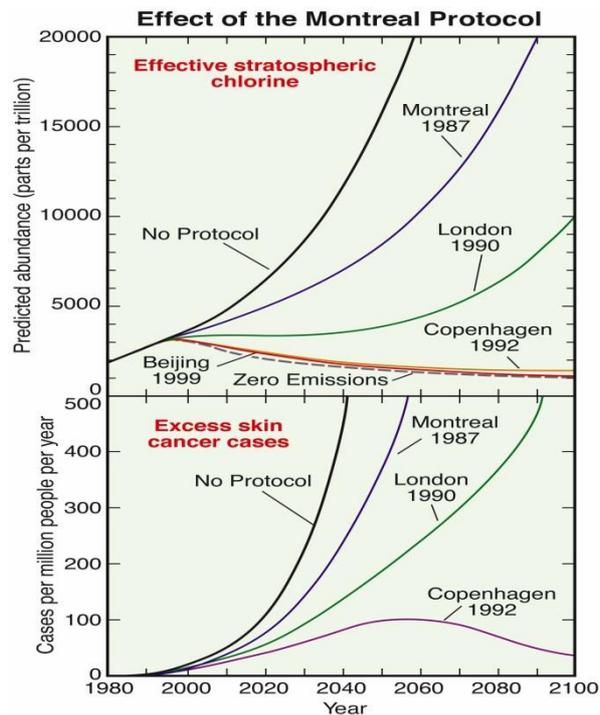


Figure 7 – La figure du haut montre comment la quantité de Chlore dans la stratosphère a été réduite par application du Protocole de Montréal et de ses amendements successifs. La figure du bas indique les conséquences de la destruction de l'ozone sur le nombre estimé de cancers de la peau.

Le résultat du Protocole de Montréal et de ses amendements successifs est maintenant tout à fait visible, comme on le voit dans la figure suivante. Celle-ci représente l'évolution de la production et de la présence des substances destructrices d'ozone, de l'ozone total et du rayonnement ultraviolet depuis les années 1970 jusqu'à 2100. La date de 1980 est indiquée comme correspondant au début de la mise en évidence expérimentale de la destruction de l'ozone.

- Production des substances destructrices d'ozone (ODS) avant et après la signature du Protocole de Montréal en 1987. En noir les CFC, en gris les HCFC, substituts qui ont été utilisés après 1987 et qui sont moins nocifs pour l'ozone que les CFC.
- Abondance effective des composés du chlore et du brome présents dans la stratosphère. L'incertitude est liée au délai entre l'émission de ces substances à la surface du sol et leur présence dans la stratosphère.

- c) Évolution de la colonne d'ozone total en dehors des régions polaires (60°N-60°S). Les traits en noir représentent les mesures, les régions grises correspondant aux résultats des modèles. Les valeurs d'avant 1980 sont utilisées comme référence pour définir l'état non perturbé.
- d) Évolution du rayonnement ultraviolet pour le soleil au zénith. En gris l'estimation à partir des modèles en réponse au changement de l'ozone. En hachuré, l'estimation prend en compte l'influence de modification dans la nébulosité et la présence d'aérosols sous l'effet du changement climatique.

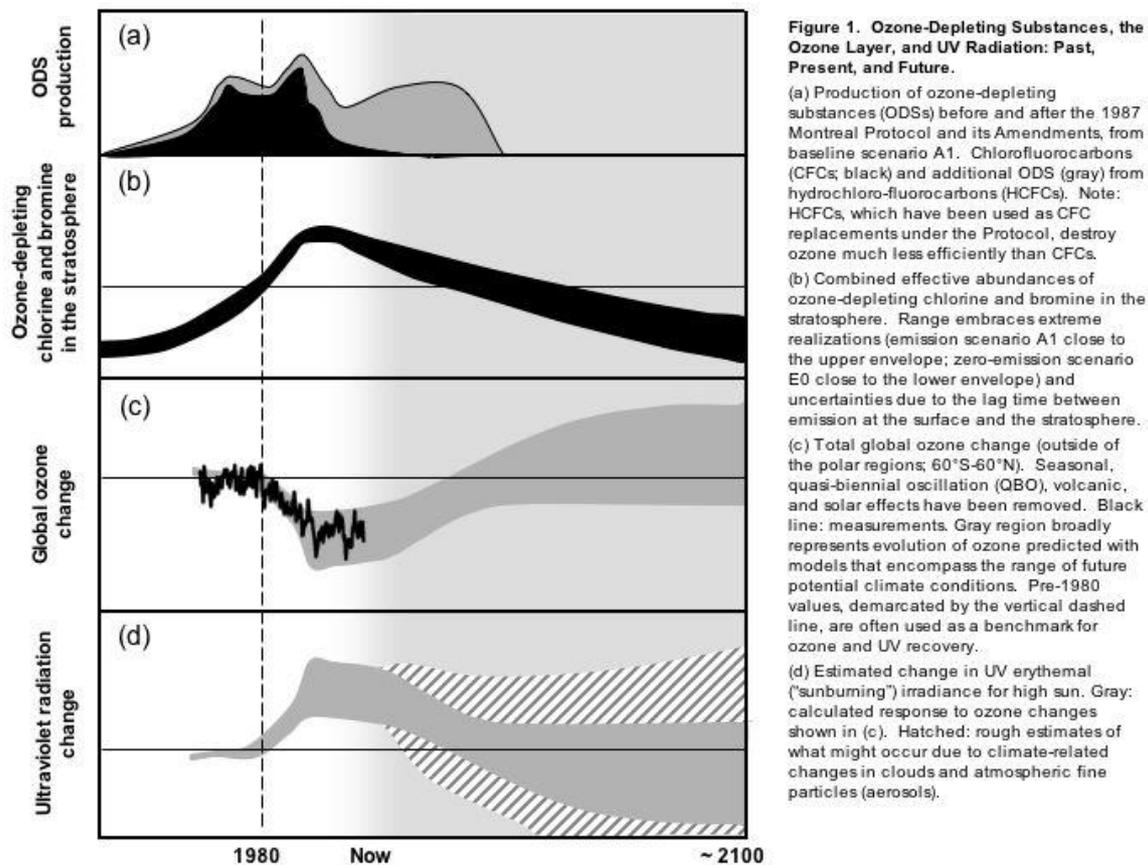


Figure 8 – Extraite du résumé du rapport WMO-UNEP (2010) sur l'état de l'ozone.

### La récupération de la couche d'ozone

On remarque sur la figure précédente que malgré les mesures prises, le problème de l'ozone n'a cependant pas disparu et persistera jusqu'au milieu du siècle. Cependant en 2006 on a constaté, pour la première fois depuis 30 ans, que l'ozone a cessé de diminuer à moyenne latitude. S'il est prématuré de pouvoir affirmer que son retour à l'état précédent est amorcé, étant donné les fluctuations et les incertitudes dans les mesures, on a toute raison de croire que la période de récupération a commencé. La poursuite de ce retour à l'état précédent implique pour tous les pays le respect du Protocole de Montréal et de ses amendements.

L'observation d'un trou d'ozone très accentué en Antarctique en septembre 2006 ne doit pas être considéré comme un signe alarmant, car on s'attend à observer d'une année à l'autre ce type de fluctuations d'origine météorologique. Un exemple plus récent de « trou d'ozone » exceptionnel « a été observé au printemps 2011 au-dessus de l'Arctique. La situation

présentée sur la figure 9 est plus voisine de celle que l'on voit habituellement au-dessus de l'Antarctique.

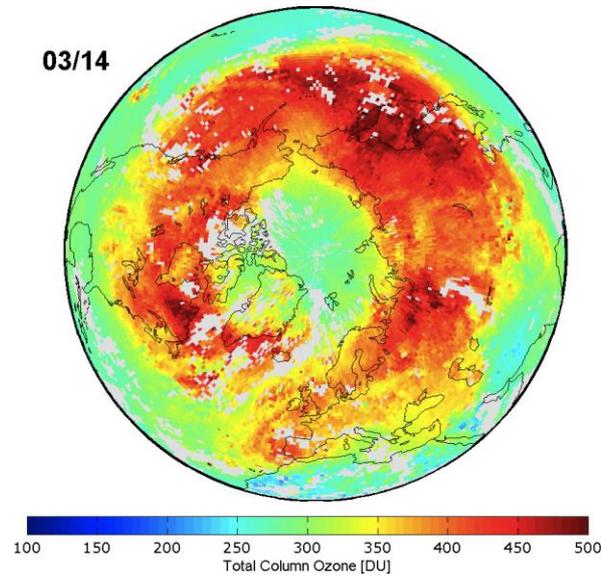


Figure 9 – Trou d’ozone au-dessus de l’Arctique le 14/03/2011.

La diminution d’ozone au-dessus de l’Arctique a atteint 40% à la fin du mois de Mars 2011. La surveillance satellitaire, notamment par le satellite IASI à bord de MetOp, a permis de suivre l’évolution de façon continue de cet épisode unique. Les causes de cette diminution d’ozone sont d’une part la stabilité exceptionnelle du vortex pendant ce printemps et d’autre part la présence d’une température stratosphérique particulièrement basse cette année (situations qui existent chaque année en Antarctique). Cet épisode n’a rien d’inquiétant, quant à la récupération de l’ozone, car il relève de la variabilité météorologique à laquelle on ne peut échapper.

La figure 10 indique clairement les situations différentes en Arctique et en Antarctique telles qu’elles ont été observées de 2010 à 2013.

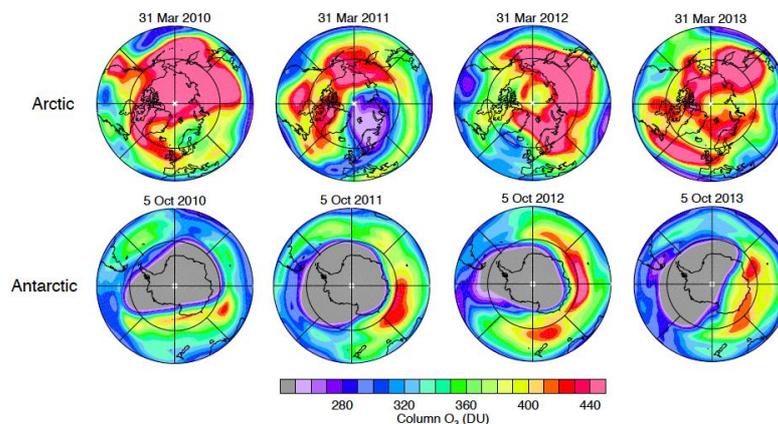


Figure 10 – Evolution du contenu intégré d’ozone au dessus des régions polaires au cours des 4 dernières années.

De toute façon, malgré les mesures prises, on ne verra en aucun cas un retour rapide à la situation préindustrielle. En effet d'une part, les composés chlorés et bromés restent dans l'atmosphère pendant plusieurs décennies, et malheureusement il existe encore des stocks très importants de ces produits qui sont encore utilisés illégalement dans certaines parties du monde. D'autre part, le changement climatique global subi par l'atmosphère, se traduisant notamment par le refroidissement de la stratosphère, pourrait avoir comme conséquence que l'on ne retourne jamais à l'état antérieur. Le trou d'ozone en Antarctique et les diminutions d'ozone au printemps arctique se manifesteront encore au-delà de la moitié du XXI<sup>e</sup> siècle, avec une variabilité qui rend difficile une prédiction plus précise. Cependant on commence à percevoir un début de récupération en Antarctique, même malgré la grande variabilité des phénomènes influençant l'amplitude du trou d'ozone.

### Les conséquences sur le flux ultraviolet au sol

Étant donné que l'ozone atmosphérique absorbe l'ultraviolet solaire, toute diminution d'ozone (en dehors de toute autre modification de l'atmosphère) doit entraîner une augmentation de la pénétration du flux ultraviolet au niveau du sol dans une proportion à peu près équivalente. Les mesures confirment qu'il en est bien ainsi. Ces mesures sont délicates car d'autres facteurs, comme la pollution ou la nébulosité, peuvent également perturber la transmission du flux ultraviolet. Les augmentations de l'ultraviolet les plus évidentes ont été observées au voisinage des pôles. En effet lorsque la destruction d'ozone au-dessus du pôle Sud cesse avec la fin du printemps, les masses d'air au-dessus des régions voisines de l'Antarctique sont pauvres en ozone, et des régions comme le Sud de l'Argentine et du Chili et l'Australie sont alors soumises à des flux ultraviolet dangereux. Le même phénomène se produit mais beaucoup plus faiblement sur l'Europe au printemps, et cette augmentation peut parfois être critique à haute altitude où il convient de se protéger d'exposition trop longue au soleil. Le changement d'ozone étant minimum aux latitudes tropicales, l'augmentation du flux UV y est quasi nulle. Ailleurs, par exemple en France, l'augmentation est de l'ordre de 5 %.

Si cette diminution de l'épaisseur de la couche d'ozone, aux pôles comme aux moyennes latitudes, s'était amplifiée, le monde entier aurait été soumis aux mêmes effets. Une telle augmentation de l'ultraviolet aurait présenté pour l'ensemble de la planète des risques importants tant pour l'homme que pour les animaux (cancers de la peau, cataractes...), pour les forêts et les cultures (diminution de la photosynthèse et baisse des rendements).

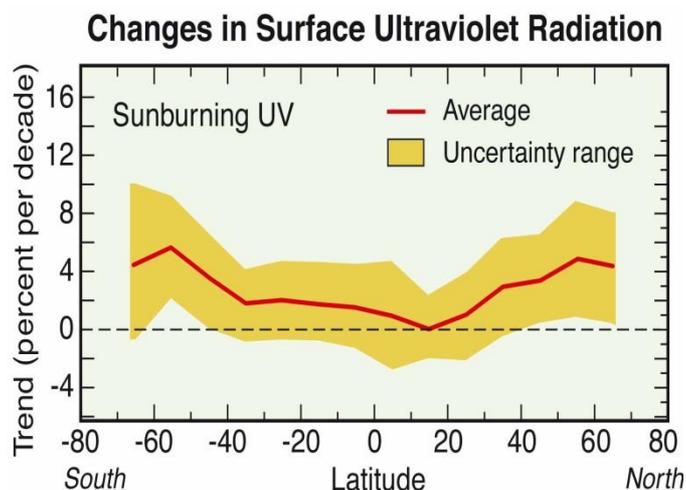


Figure 11 – Changement du rayonnement ultraviolet UV-B à la surface entre 1979 et 1992.

## Relation entre le changement climatique et le problème de l'ozone

Ces deux sujets sont très fréquemment confondus. Or la diminution d'ozone stratosphérique relève d'un problème tout à fait distinct de celui du changement climatique. Ils diffèrent à la fois quant à leurs causes et quant à leurs conséquences. En effet le changement climatique est la conséquence de l'augmentation des gaz à effet de serre, tandis que la diminution de l'ozone provient de la présence dans la stratosphère d'espèces chlorées, bromées et nitrées qui ne sont pas *a priori* des gaz à effet de serre. Les conséquences du premier concernent le changement de la température de surface, du régime de précipitations et de l'occurrence d'événements extrêmes. La conséquence du second est l'augmentation du flux ultraviolet solaire au niveau du sol.

Cependant la complexité des interactions atmosphériques et des échanges atmosphère - océan est telle que des influences mutuelles sont inévitables entre les deux phénomènes. Mais il convient dans une première approche de traiter séparément les deux problèmes.

On mentionnera trois domaines d'interaction ozone-climat:

- **L'impact des changements de l'atmosphère sur l'ozone stratosphérique.** Le changement climatique modifiant la température stratosphérique et la circulation atmosphérique affecte la vitesse des réactions chimiques et donc modifie le retour de l'ozone à son état antérieur (1980). Les modèles montrent qu'un accroissement des concentrations de  $\text{CO}_2$  et de  $\text{CH}_4$  tend à augmenter l'ozone, tandis qu'un accroissement des concentrations de  $\text{N}_2\text{O}$  tend à l'appauvrir. On a ainsi modélisé l'évolution du contenu intégré d'ozone en moyenne globale sous l'effet des changements de la composition atmosphérique.

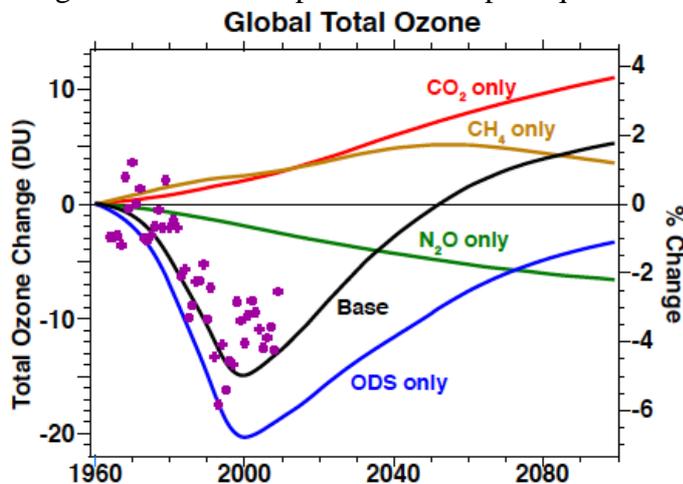


Figure 12 – Simulation de la réponse du contenu intégré d'ozone moyenné à l'échelle globale à l'évolution temporelle du contenu en SAO (courbe bleue),  $\text{CO}_2$  (courbe rouge),  $\text{CH}_4$  (courbe marron) et  $\text{N}_2\text{O}$  (courbe bleu). La valeur 0 en ordonnée correspond à la quantité d'ozone total qui existait en 1980. La réponse aux évolutions combinées des différents constituants est indiquée par la courbe noire tandis que les observations sont représentées par les symboles mauves.

Cette simulation montre une récupération de l'ozone total à l'échelle globale vers 2050, suivie d'une augmentation d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle d'environ 2 à 3% par rapport aux valeurs des années 1960-1980

- **Le rôle de l’ozone et des substituts sur le forçage radiatif du climat.**

Les CFC et certains substituts mis au point pour les remplacer sont des puissants gaz à effet de serre. Globalement ils sont responsables d'environ 13% de l'effet de serre additionnel dû à l'ensemble des gaz à effet de serre depuis 1750 (voir figure 13 et fiche Air). Le contrôle de leur production est donc essentiel pour la surveillance des changements climatiques et s'inscrit alors dans le contexte de la Convention relevant du Climat ;

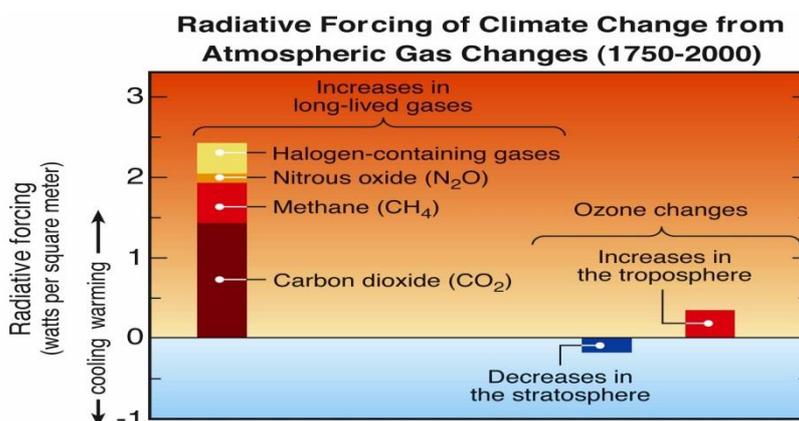


Figure 13 – Responsabilité des différents gaz à effet de serre dans le changement climatique : on voit dans cette figure que les gaz Halogènes, tant ceux qui jouent un rôle dans la destruction de l’ozone que les substituts mis en place pour obéir aux régulations, représentent environ 13 % des gaz à effet de serre, dont le plus important est le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>.

Il est d’ailleurs fort intéressant de voir comment l’application du Protocole de Montréal a servi à lutter contre le réchauffement climatique. Une étude récente montre que les interdits portant sur les substances destructrices d’ozone, ou ODS, ont fait plus pour satisfaire les objectifs du Protocole de Kyoto que les réductions d’émission des GES jusqu’à ce jour. En effet, les plus utilisées des ODS dans les années 1980 étaient les CFC qui sont de puissants GES et ont une longue durée de vie. Si leur croissance avait continué au rythme des années 1970, ils auraient eu à long terme sur le réchauffement de la planète un effet considérable. Grâce au Protocole de Montréal, mis en place en 1987, ceux-ci ont été interdits et leur présence dans l’atmosphère a diminué depuis cette date, comme le montre très bien la figure 14. Les substances de remplacement développés et utilisés depuis 1987 doivent donc satisfaire 2 critères : ne pas être des ODS et ne pas être des GES. Les résultats relativement satisfaisants aujourd’hui quant à leur rôle de GES comparé à celui du CO<sub>2</sub> sont une raison d’être fier de la mise en œuvre rapide et effective du Protocole de Montréal il y a 20 ans. Cependant certains des substituts se sont montrés suffisamment actifs en tant que GES qu’un Amendement a dû être apporté au Protocole de Montréal en Janvier 2009, l’Amendement de Kidal pour limiter l’utilisation des HFC.

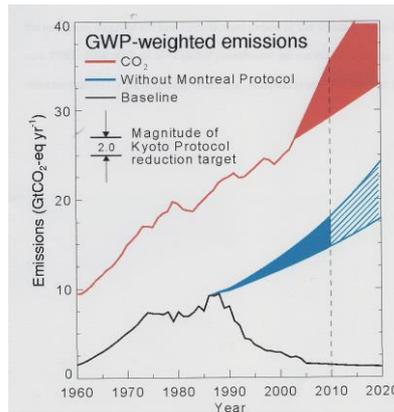


Figure 14 – Potentiel de réchauffement global pour CO<sub>2</sub> (en rouge) et les CFCs (en noir) pour la période 1960-2020. L'effet des CFCs est normalisé par rapport à l'équivalent en GtCO<sub>2</sub>. La région en bleu correspond à une augmentation de 2-3% de la production de CFCs prévue en l'absence du Protocole de Montréal après 1987. Les émissions de CO<sub>2</sub> tiennent compte des émissions fossiles et de la production de ciment et de leur évolution prévisible. L'amplitude de la réduction attendue de l'application de la première période d'engagement du Protocole de Kyoto est donnée en référence.

- L'impact de la diminution de l'ozone stratosphérique sur le climat.** Le trou d'ozone Antarctique a affecté le climat de la surface océanique dans l'Hémisphère sud. Les changements des vents de surface sur les hautes et moyennes latitudes de l'Hémisphère Sud pendant l'été austral, conséquences du trou d'ozone, ont contribué au réchauffement observé dans la Péninsule Antarctique et au refroidissement sur le haut plateau. Les changements de vent ont aussi entraîné des changements régionaux des précipitations, l'augmentation de la glace de mer autour de l'Antarctique et le réchauffement de l'océan Sud. Toutes ces évolutions ne peuvent pas s'expliquer par l'augmentation des gaz à effet de serre. Mais cette situation ne devrait pas persister au-delà de quelques décennies du fait de la récupération de l'ozone et de l'augmentation des gaz à effet de serre.

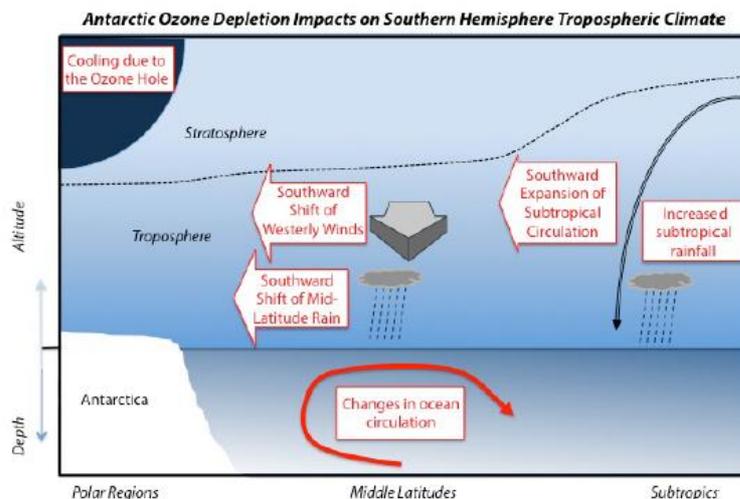


Figure 15 – Illustration schématique de l'impact de la perte d'ozone antarctique et du refroidissement associé sur le sens de la circulation océanique, le climat troposphérique et les océans dans l'hémisphère sud.

## **En conclusion**

À l'échelle de la planète, le problème du maintien de la couche d'ozone stratosphérique qui entoure la Terre est un excellent exemple de problème d'environnement global. La façon dont il a été abordé et dont il a été en grande partie résolu par la communauté scientifique dans les deux dernières décennies peut être considéré comme un modèle à suivre dans d'autres domaines environnementaux, et ceci pour diverses raisons : tout d'abord par la rapidité de la réponse, et ensuite par l'accord rapidement acquis à l'échelle internationale. En effet il convenait de prendre des décisions rapidement car ces substances resteront dans l'atmosphère pendant des décennies étant donné leur stabilité chimique et il convenait de les interdire le plus tôt possible. Ensuite, une mesure prise localement mais qui n'aurait pas été suivie à l'échelle globale n'aurait eu qu'un impact très limité. Cependant il existe encore des grandes quantités de CFC encore en circulation, notamment dans les vieux réfrigérateurs, des productions de HFC désormais interdits et il convient de ne pas les relâcher dans l'atmosphère.

### **Sites web :**

<http://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/2014/>

<http://ozone.unep.org/french/index.asp>