



Environnement
Canada

Environment
Canada

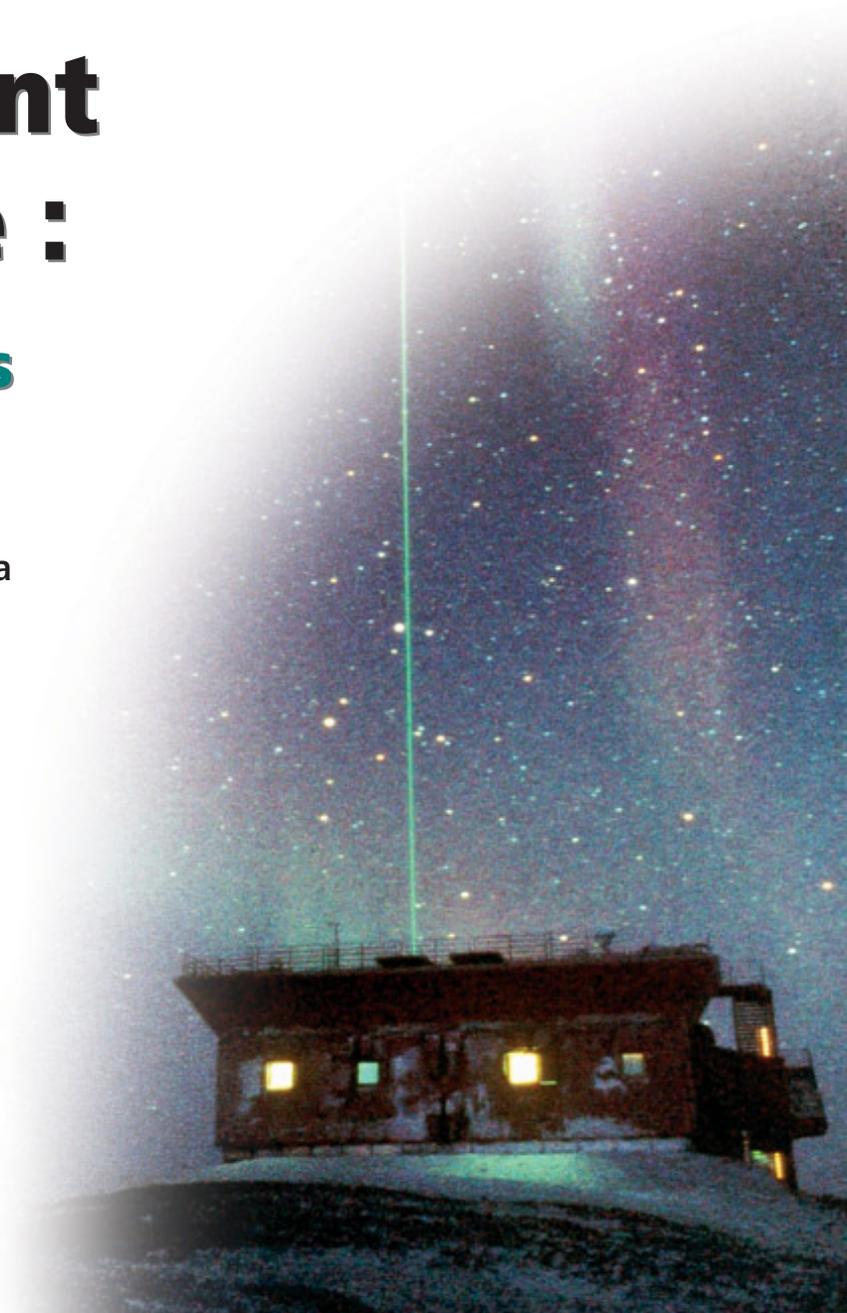
Appauvrissement de l'ozone et changement climatique : des problèmes liés

Canada



Appauvrissement de l'ozone et changement climatique : des problèmes liés

Angus Fergusson
Service météorologique du Canada



Publication autorisée par le ministre de l'Environnement
Copyright © Travaux publics et Services gouvernementaux Canada, 2001

N° de catalogue EN56-168/2001F
ISBN : 0-662-30692-9

Also available in English

Auteur : Angus Fergusson (*Environnement Canada*)

Éditeurs : David Francis (*Lanark House Communications*)
David Wardle / Jim Kerr (*Environnement Canada*)

Contributeurs : Bruce McArthur (*Environnement Canada*) : Observatoire de Bratt's Lake
David Tarasick (*Environnement Canada*) : Modèle canadien de l'atmosphère moyenne
Tom McElroy (*Environnement Canada*) : Projet MANTRA

Remerciements spéciaux à : Vitali Fioletov (*Environnement Canada*)
Hans Fast (*Environnement Canada*)

Illustrations : Angus Fergusson (*Environnement Canada*)
John Bird (*Environnement Canada*)
Brent Colpitts
Ray Jackson

Conception : BTT Communications

On peut se procurer gratuitement des exemplaires supplémentaires auprès de :

Angus Fergusson
Direction de l'évaluation de la science et de l'intégration des politiques
Service météorologique du Canada
4905, rue Dufferin
Downsview (Ontario)
M3H 5T4
Courriel : Angus.Fergusson@ec.gc.ca

Table des matières

Résumé	2
Introduction	4
L'atmosphère et ses effets radiatifs	6
La dynamique de l'atmosphère	10
La chimie de l'atmosphère	12
Les liens biogéochimiques : impact de l'augmentation du rayonnement UV	14
La recherche et la surveillance au Canada	16
Les implications pour les politiques	20
Les recherches nécessaires	22
Les connexions	26
Bibliographie	28



Figure 1. Comparée à la planète, l'atmosphère de la Terre, vue de l'espace, semble remarquablement mince, comme la peau sur une pomme. Sur cette photographie, on voit bien les deux plus basses couches de l'atmosphère, la troposphère et la stratosphère. C'est dans la stratosphère qu'est située la couche d'ozone qui protège les organismes vivants de l'intense rayonnement ultraviolet. La troposphère, quant à elle, est la couche où se manifeste la majeure partie de l'activité météorologique. Le sommet du nuage d'orage s'est aplati à la tropopause, qui est la limite entre les deux couches. Les interactions entre la troposphère et la stratosphère constituent d'importantes connexions entre l'appauvrissement de l'ozone et le changement climatique.

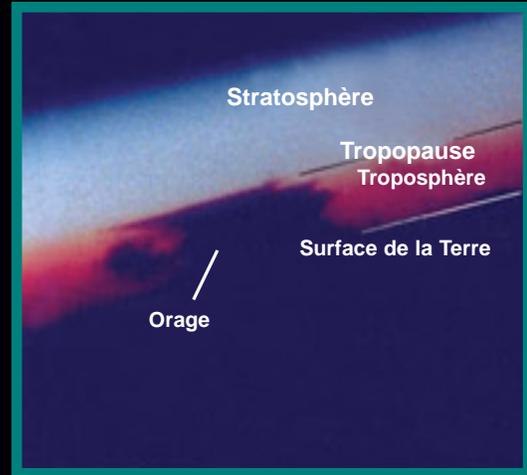
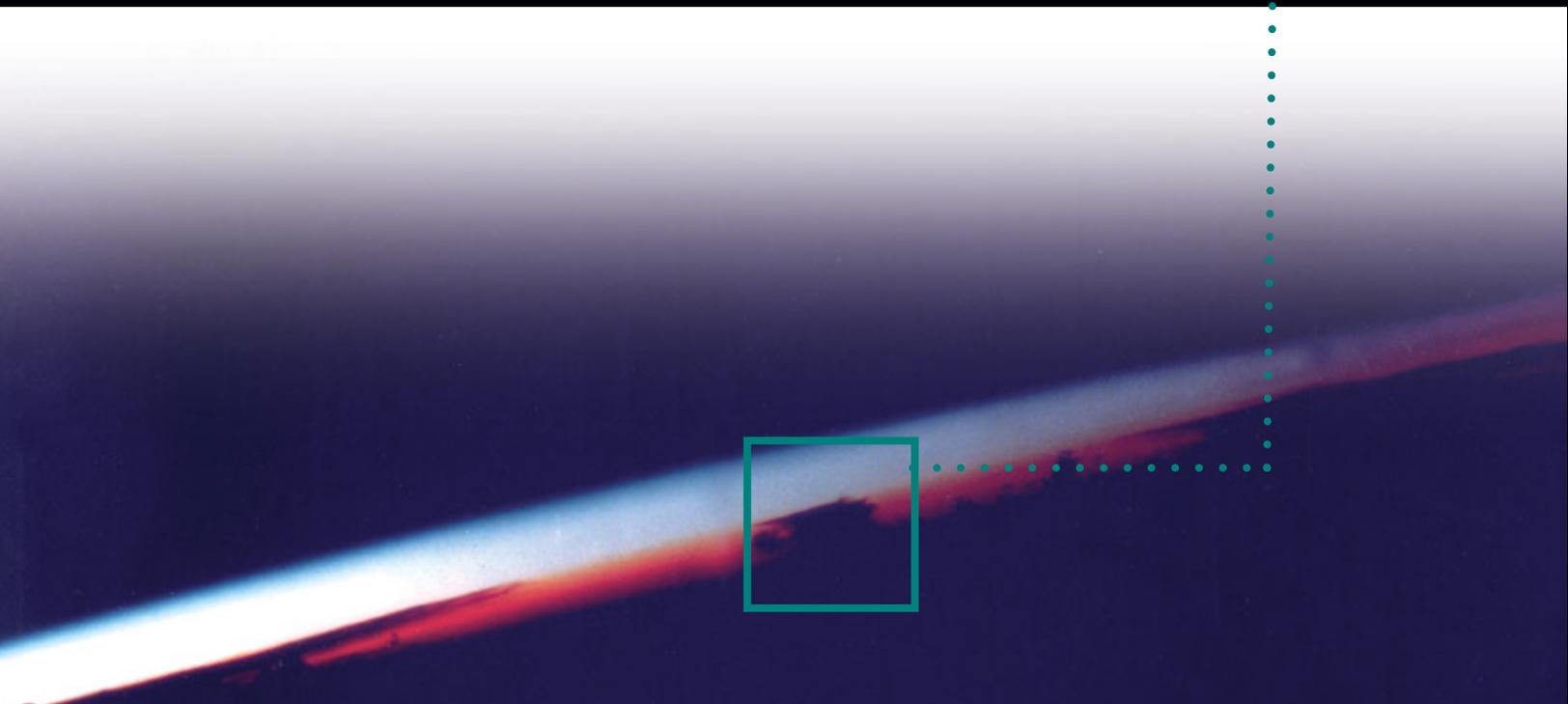


Figure 1
Source: NASA



Résumé

L'appauvrissement de l'ozone et le changement climatique ont généralement été considérés comme des problèmes environnementaux ayant peu en commun, hormis leur portée planétaire et le rôle principal qu'y jouaient les CFC et autres halocarbures. Cependant, à mesure que les connaissances évoluaient, on a pris conscience que des liens très importants les unissaient. Et ces liens auront une influence sur l'évolution future de l'atmosphère et de ces problèmes (*figure 1*).

Certains des plus importants de ces liens tiennent à la façon dont les gaz à effet de serre et les substances qui appauvrissent la couche d'ozone modifient les processus radiatifs dans l'atmosphère, provoquant ainsi une augmentation du réchauffement planétaire et de l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique. Ces changements induisent un réchauffement de la troposphère (région de l'atmosphère qui va du sol jusqu'à 8 à 16 km d'altitude) et un refroidissement de la stratosphère (la couche qui va de la troposphère jusqu'à 50 km et où se situe la couche d'ozone). Le refroidissement stratosphérique favorise la formation de nuages stratosphériques polaires

(PSC), cause principale du développement des trous d'ozone polaires.

L'accroissement de l'effet de serre peut également occasionner des changements dans la circulation de la troposphère qui, à leur tour, modifient la circulation dans la stratosphère. Les scientifiques pensent que ces changements augmentent les forces de refroidissement qui agissent sur la stratosphère au-dessus des pôles, d'où la formation des trous d'ozone. De plus, on a des indications que les changements de la circulation stratosphérique peuvent modifier les régimes météorologiques de la troposphère. D'autres liens entre le changement climatique et l'appauvrissement de l'ozone sont attribués à l'effet de l'augmentation des niveaux du rayonnement ultraviolet sur les réactions chimiques induites par le rayonnement solaire dans l'atmosphère ainsi qu'au changement dans les processus biologiques qui influent sur sa composition.

Il en résulte une intensification du changement climatique et de l'appauvrissement de l'ozone ainsi qu'un ralentissement possible du rétablissement de la couche

d'ozone en réponse à la diminution du niveau des CFC et autres substances réglementées par le Protocole de Montréal. Afin de mieux comprendre ces relations, les chercheurs se concentrent sur la manière dont la troposphère et la stratosphère interagissent. Les scientifiques d'Environnement Canada participent à cette recherche de diverses façons. Ils surveillent, entre autres, le niveau du rayonnement solaire et les concentrations d'ozone, et collaborent aux recherches stratosphériques par ballon et à la modélisation atmosphérique.

Le réchauffement dû à l'effet de serre et l'amincissement de la couche d'ozone stratosphérique sont le résultat des activités humaines qui ont changé la composition de l'atmosphère de manière subtile, mais néanmoins profonde, depuis le début de la révolution industrielle, il y a plus de deux cents ans. En adoptant une approche intégrée à l'appauvrissement de l'ozone et au changement climatique, les gouvernements et les scientifiques auront de meilleures chances de comprendre et de limiter les énormes changements que les activités humaines ont infligés et infligeront encore à l'atmosphère.

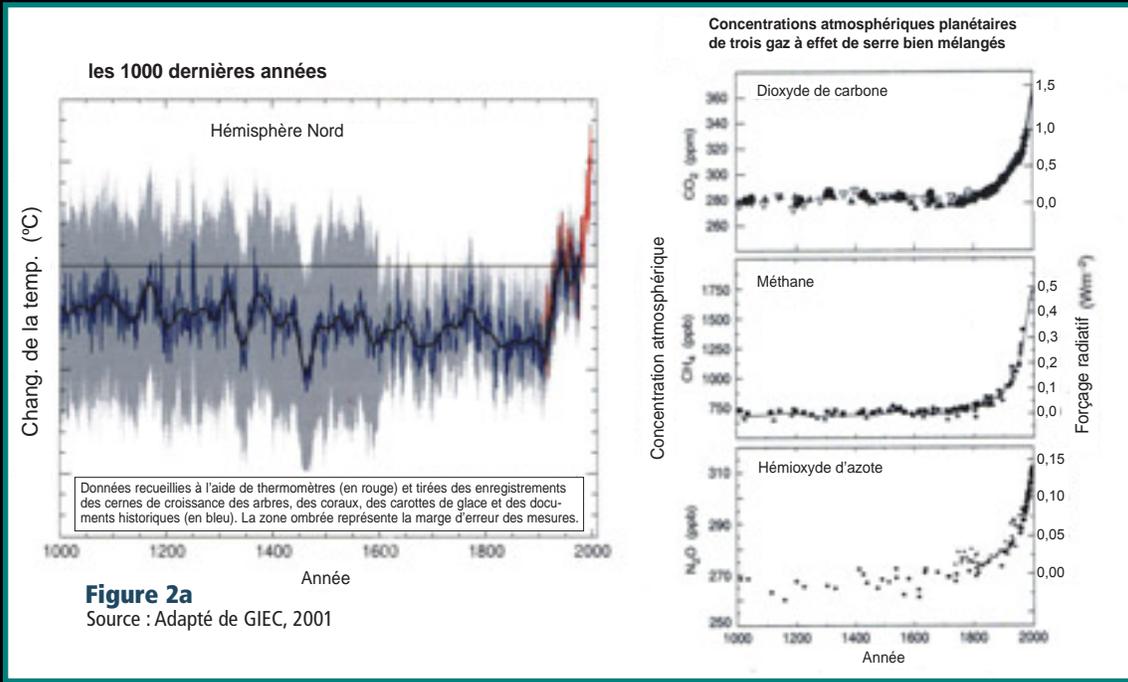


Figure 2a
Source : Adapté de GIEC, 2001

Figure 2a. Les gaz à effet de serre, comme le dioxyde de carbone, le méthane et l'hémioxyde d'azote, influent sur le climat en maintenant la chaleur à proximité de la surface de la Terre. Les concentrations de ces gaz ont commencé à monter au XIX^e siècle et ont augmenté de façon exponentielle au XX^e, parallèlement à l'expansion des économies industrialisées et à la croissance démographique. Au cours du dernier siècle, la température planétaire moyenne s'est élevée d'environ 0,6 °C, et l'on prévoit des hausses significativement plus élevées au XXI^e siècle. Le réchauffement de l'atmosphère devrait aussi entraîner des modifications d'autres éléments du climat, dont des changements des précipitations et de l'évaporation, de la circulation et des phénomènes météorologiques extrêmes.

Figure 2b. L'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique a été causé en grande partie par des composés chlorés et bromés de longue durée de vie, comme les CFC et les halons, qui ont fini par atteindre la stratosphère. L'utilisation de ces composés a beaucoup augmenté dans les années 1960 et 1970. Les indications de l'appauvrissement de l'ozone dans la stratosphère ont commencé à se manifester dans les années 1980. Les concentrations atmosphériques de la plupart des substances destructrices de l'ozone ont culminé, ou leur augmentation a commencé à ralentir, grâce à leur élimination aux termes du Protocole de Montréal. Les concentrations de ces substances devraient décliner au cours du prochain siècle, ce qui permettra un rétablissement graduel de la couche d'ozone.

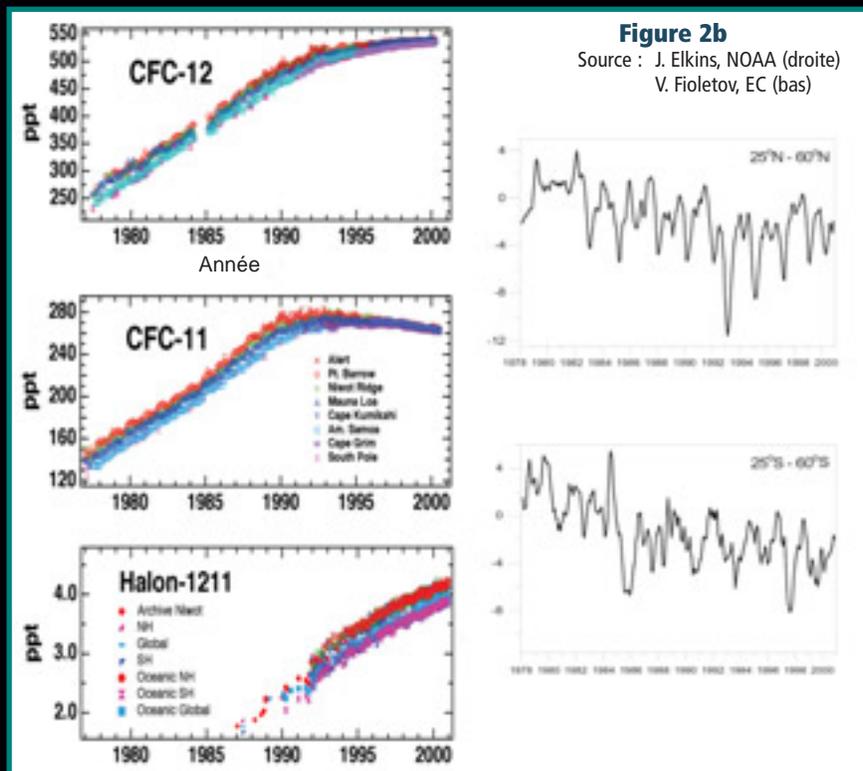


Figure 2b
Source : J. Elkins, NOAA (droite)
V. Fioletov, EC (bas)

Introduction

Depuis plus d'un quart de siècle, le changement climatique et l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique ont été des problèmes environnementaux de premier plan. La plupart du temps, ils ont pourtant été analysés séparément. Ainsi, les chercheurs ont établi des programmes séparés afin d'étudier les questions scientifiques sous-jacentes, tandis que les gouvernements ont mis en place des accords internationaux séparés afin de coordonner les mesures de limitation.

Il est certain que ces problèmes sont distincts à bien des égards. D'un côté, le changement climatique est dû au rejet, par les activités humaines, de dioxyde de carbone, de méthane et d'autres gaz à effet de serre (*figure 2a*). La recherche sur le sujet s'est donc concentrée largement (mais pas exclusivement) sur les tendances et les processus à l'intérieur de la troposphère, couche d'air turbulent d'une hauteur de 8 à 16 km et qui est la plus proche du sol. D'un autre côté, l'appauvrissement de la couche d'ozone qui protège la Terre est le résultat de l'utilisation de certains produits industriels chlorés et bromés qui accroissent l'intensité du rayonnement ultraviolet à la surface de la planète (*figure 2b*). La recherche sur ce sujet s'est donc concentrée largement (mais pas exclusivement) sur les tendances et les processus à l'intérieur de la

stratosphère, couche d'air stratifié relativement stable où se situe la couche d'ozone et qui s'étend du haut de la troposphère jusqu'à une altitude de 50 km. Cependant, à mesure que les scientifiques ont mieux compris ces problèmes et les processus physiques et chimiques qui les régissent, ils ont réalisé qu'ils sont liés par un grand nombre de connexions.

Cette compréhension est accompagnée, chez les décideurs et les scientifiques, d'une prise de conscience croissante du fait que les questions atmosphériques ne peuvent être résolues séparément. Les activités humaines contribuant au changement climatique et à l'appauvrissement de la couche d'ozone, ou à d'autres problèmes de pollution de l'air, affectent la même atmosphère, qui est une entité très complexe. De ce fait, modifier un de ses aspects peut souvent engendrer des modifications d'autres aspects de ce système atmosphérique. Les activités humaines qui engendrent des changements dans l'atmosphère, si minimes soient-ils, peuvent avoir d'énormes répercussions. Afin de prendre en compte les

nombreuses interactions qui ont lieu dans l'atmosphère, les scientifiques et les décideurs adoptent de plus en plus une approche globale des questions atmosphériques.

Le lien le plus évident entre l'appauvrissement de l'ozone et le changement climatique est le fait que l'ozone lui-même et certaines des plus importantes substances qui l'appauvrissent, telles que les chlorofluorocarbures (CFC) et les hydrochlorofluorocarbures (HCFC), sont aussi de très puissants gaz à effet de serre. Mais l'appauvrissement de l'ozone et le changement climatique sont unis par d'autres liens, notamment leurs effets sur les processus physiques et chimiques en jeu dans l'atmosphère et les interactions entre l'atmosphère et les autres composantes de l'écosystème mondial.

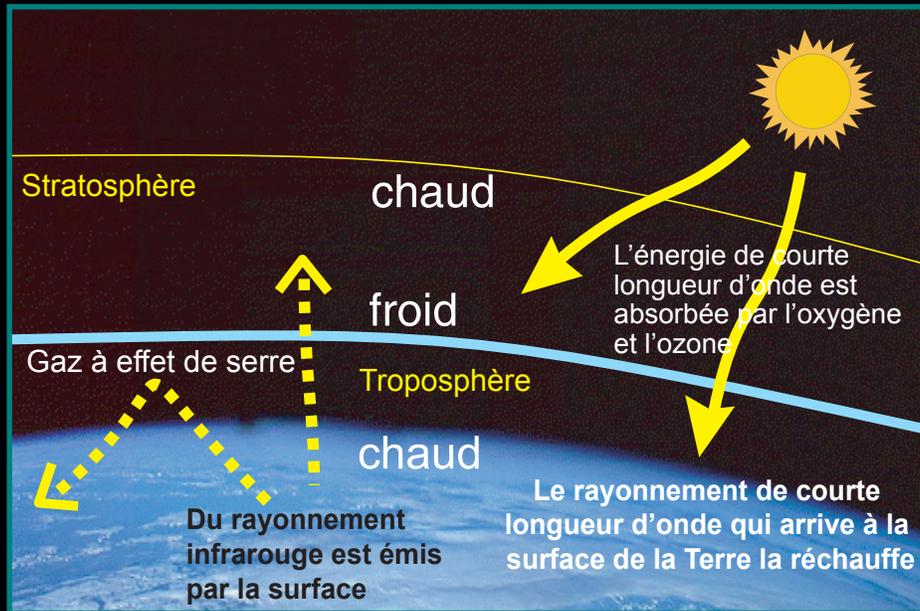


Figure 3

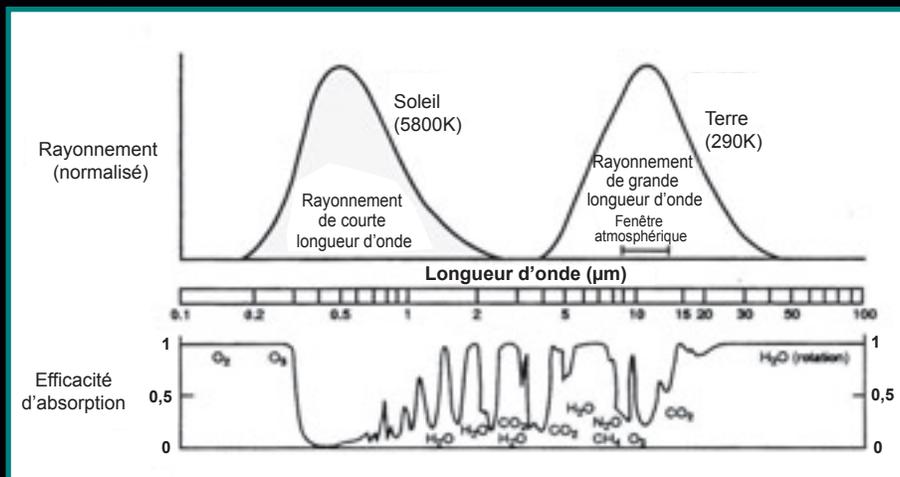
Source : Adapté de Jacob, 1999

Figure 3. Le contraste entre les régimes thermiques de la troposphère et de la stratosphère tient aux différences dans la manière dont l'énergie radiative est transférée dans l'atmosphère. La stratosphère est réchauffée par le dessus lorsque le rayonnement ultraviolet intense est absorbé par l'oxygène et l'ozone. La troposphère est réchauffée par le bas lorsque la surface de la Terre, réchauffée par le rayonnement solaire incident, émet du rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde, qui est ensuite absorbé et réémis par les gaz à effet de serre présents dans l'air au-dessus d'elle. Une petite quantité de chaleur est aussi transférée directement à l'air par contact direct avec la surface et par évaporation et condensation de l'humidité. Comme la troposphère devient généralement plus froide avec l'altitude, l'air plus chaud et plus léger de la surface s'élève facilement. Par conséquent, l'air de la troposphère est souvent turbulent et bien mélangé. La stratosphère, quant à elle, tend à être très stable parce que l'élévation de la température avec l'altitude empêche le mélange vertical de l'air.

Figure 4. On peut avoir une idée de l'effet de serre en comparant les longueurs d'onde auxquelles différents gaz de l'atmosphère absorbent le rayonnement avec celles auxquelles le rayonnement entre dans l'atmosphère et en sort. Le Soleil, étant très chaud, émet du rayonnement de courte longueur d'onde et, bien que les plus courtes de ces longueurs d'onde soient absorbées par l'oxygène et l'ozone, la plus grande partie du rayonnement solaire n'est pas absorbée par les gaz de l'atmosphère. La Terre, beaucoup plus froide, émet du rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde, mais la plupart des longueurs d'onde dans cette partie du spectre sont facilement absorbées par la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane, l'hémioxyde d'azote, l'ozone et d'autres gaz à effet de serre. L'atmosphère fournit donc une fenêtre très large par laquelle le rayonnement solaire incident peut pénétrer, mais seulement une fenêtre très étroite par laquelle le rayonnement infrarouge peut sortir.

Figure 4

Source : Adapté de Jacob, 1999



L'atmosphère et ses effets radiatifs

Les processus radiatifs influent énormément sur le comportement de l'atmosphère, parce qu'ils régissent la quantité d'énergie qui entre dans le système Terre-atmosphère et qui en sort, et donc la quantité d'énergie disponible pour réchauffer l'air, faire évaporer l'humidité, et mettre en mouvement les masses d'air. Cette énergie entre d'abord dans l'atmosphère sous la forme de rayonnement solaire de courte longueur d'onde, mais est transférée à la troposphère et à la stratosphère de façons très différentes, ce qui confère à ces deux couches de l'atmosphère des structures et des caractéristiques très différentes (*figure 3*).

La stratosphère, réchauffée du haut vers le bas, est donc plus chaude au sommet qu'à la base. Par conséquent, c'est dans le bas qu'on trouve l'air le plus dense de la stratosphère, il y a peu de mélange vertical, et la stratosphère est une couche très stable. De la chaleur s'ajoute à la stratosphère lorsque le fort rayonnement UV-C du Soleil est absorbé par les molécules d'oxygène et les fait se dissocier. Un des résultats de ce processus est la production d'ozone et la formation de la couche d'ozone dans la stratosphère. Le réchauffement s'accroît quand le rayonnement

UV-B, intense mais légèrement moins puissant, est intercepté par les molécules d'ozone et les détruit. Un sous-produit avantageux de ces processus est que la majeure partie du rayonnement ultraviolet qui est nocif pour les végétaux et les animaux se trouve filtré dans la stratosphère et n'atteint pas la surface de la Terre. Le fait que l'ozone absorbe du rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre induit aussi un certain réchauffement supplémentaire de la stratosphère.

Dans la troposphère, par contraste, l'atmosphère n'absorbe directement qu'une très faible partie du rayonnement solaire incident. À la place, le rayonnement de courte longueur d'onde réchauffe la surface de la Terre, qui transfère ensuite cette énergie thermique à l'atmosphère de diverses manières – en partie par contact direct entre la surface et l'air, en partie par évaporation et condensation de l'humidité, mais surtout par émission de rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde, qui est absorbé par la vapeur d'eau et d'autres gaz à effet de serre présents dans l'air, comme le dioxyde de carbone, le

méthane, l'hémioxyde d'azote et l'ozone. En renvoyant une partie de ce rayonnement de grande longueur d'onde vers la surface de la Terre, ces gaz conservent la chaleur dans la couche inférieure de l'atmosphère et contribuent à la rendre plus chaude. C'est grâce à cet effet de serre que la température moyenne de la Terre est de quelque 33 °C plus élevée qu'elle ne le serait autrement, et que la planète peut supporter la vie (*figure 4*).

Étant ainsi réchauffé, l'air de la troposphère est généralement le plus chaud en surface et se refroidit avec l'altitude. Comme l'air chaud est moins dense que l'air froid, il s'élève et l'air plus frais se déplace sur la surface pour le remplacer. Cet écoulement convectif simple est modifié par la rotation de la Terre, les caractéristiques de la surface et les différences de température entre l'équateur et les pôles. Il en résulte une couche d'atmosphère assez turbulente dans laquelle l'air circule de façon complexe et variable, déplaçant l'énergie et l'humidité d'un endroit à un autre.

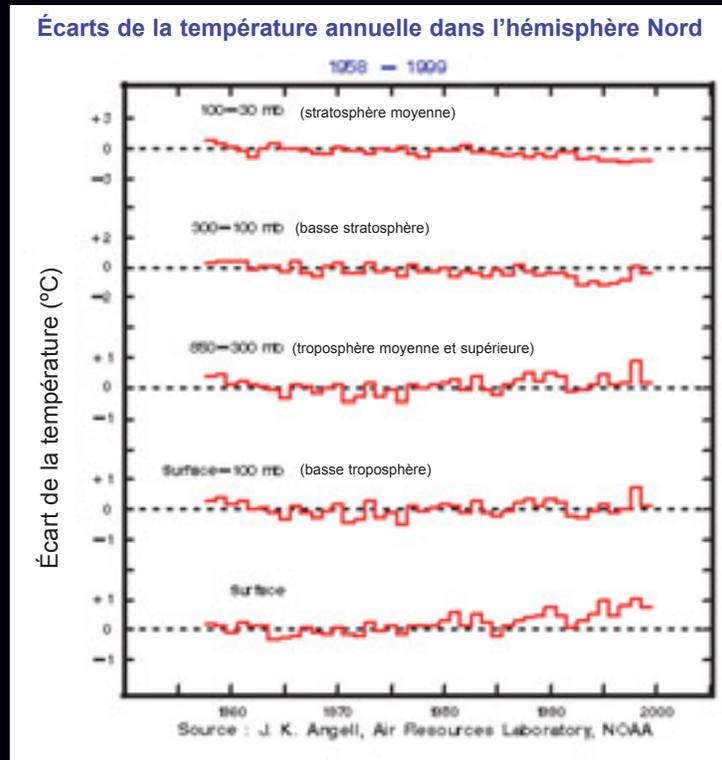


Figure 5

Figure 5. La stratosphère a connu un refroidissement significatif depuis les environs de 1980, surtout à cause de la perte d'ozone, mais aussi à cause de l'accumulation de gaz à effet de serre dans la troposphère. Aux latitudes moyennes de l'hémisphère Nord, la tendance au refroidissement a été considérablement plus grande dans la stratosphère moyenne et supérieure que dans le bas de cette couche.

Figure 6. Des nuages stratosphériques polaires comme celui-ci, photographié en Suède pendant l'hiver 2000, se forment dans la basse stratosphère lorsque les températures tombent en dessous d'environ $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ces nuages favorisent des réactions chimiques qui transforment des composés bromés et chlorés stables en substances destructrices de l'ozone plus actives. Le refroidissement de la stratosphère dû au changement climatique et à l'appauvrissement de l'ozone accroît la possibilité que de tels nuages se forment.

Figure 6



Lorsque des substances chimiques qui appauvrissent la couche d'ozone sont libérées dans l'atmosphère, cependant, ces processus radiatifs subissent diverses modifications :

- Étant donné que les substances qui détruisent le plus efficacement l'ozone, comme les CFC et les HCFC, sont aussi de puissants gaz à effet de serre, l'effet de serre se trouve renforcé; la surface de la Terre et la basse troposphère deviennent alors plus chaudes.
- Le réchauffement imputable aux CFC et aux HCFC est cependant compensé en partie par les pertes d'ozone que ces substances chimiques causent dans la basse stratosphère. Comme l'ozone est un gaz à effet de serre, un appauvrissement de l'ozone stratosphérique affaiblit l'effet de serre naturel et refroidit la stratosphère.
- L'amincissement de la couche d'ozone a aussi pour effet que moins de chaleur provenant de l'absorption des UV-B par les molécules d'ozone est transmise à la stratosphère. Cette situation a aussi un effet refroidissant sur la stratosphère.
- Comme il y a dans la stratosphère moins de molécules d'ozone qui peuvent absorber le rayonnement UV-B, celui-ci atteint le sol en plus grande quantité, ce qui contribue à un réchauffement supplémentaire de la surface de la Terre et de la basse troposphère.

L'augmentation de l'abondance des gaz à effet de serre a des résultats similaires. À mesure que les

concentrations de gaz à effet de serre augmentent, le flux entrant de rayonnement de grande longueur d'onde augmente et le flux sortant diminue, ce qui entraîne un réchauffement dans la troposphère et un refroidissement dans la stratosphère (*figure 5*). Bien que tous les gaz à effet de serre contribuent au réchauffement dans la troposphère, leurs effets dans la stratosphère peuvent varier considérablement de l'un à l'autre, selon que la réduction des émissions sortantes qu'ils causent est plus importante au sommet de cette couche ou à la base. C'est le dioxyde de carbone qui refroidit le plus la stratosphère, alors que les CFC, eux, la réchauffent. Le résultat net de l'augmentation des concentrations de tous les gaz à effet de serre reste cependant un refroidissement de la stratosphère.

Le refroidissement de la stratosphère a d'importantes conséquences pour l'appauvrissement de l'ozone, parce qu'il contribue à la formation de nuages stratosphériques polaires (PSC). Ces nuages (*figure 6*), qui ne se forment qu'à des températures extrêmement basses dans la partie inférieure de la stratosphère pendant la période d'obscurité de l'hiver polaire, constituent un milieu dans lequel prennent place des réactions chimiques qui transforment des composés chlorés et bromés stables en substances beaucoup plus actives. Ce sont ces dernières qui causent une

destruction rapide de l'ozone lorsque le soleil revient sur les régions polaires au printemps. Les PSC sont donc un facteur clé du grave appauvrissement de l'ozone qui survient à cette saison dans ces régions.

Les différentes forces de réchauffement et de refroidissement qui découlent de l'appauvrissement de la couche d'ozone et de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre ont fait l'objet de mesures à l'échelle planétaire et d'études au moyen de modèles informatiques. Ces études indiquent que le résultat net de toutes ces forces antagonistes est un réchauffement en surface (imputable surtout à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre), une élévation faible ou négligeable de la température dans la troposphère moyenne à supérieure, et un refroidissement de la stratosphère (imputable surtout à la perte d'ozone).

Il n'en demeure pas moins que les impacts des gaz à effet de serre et de l'appauvrissement de l'ozone sur le bilan radiatif sont très complexes, et que de nombreuses incertitudes persistent. Divers efforts de recherche sont actuellement en cours pour tenter de lever ces incertitudes.



La dynamique de l'atmosphère

À mesure que les gaz à effet de serre s'accumulent dans l'atmosphère, ils modifient les différences de température entre les diverses parties du globe et les divers niveaux de l'atmosphère. Les régimes de circulation atmosphérique se trouvent ainsi altérés, et l'on a de bonnes raisons de croire que ces changements de la circulation peuvent accentuer l'appauvrissement de l'ozone au-dessus des pôles en affaiblissant certaines des forces de réchauffement qui agissent sur la stratosphère polaire.

L'une de ces forces, le réchauffement dynamique, est associée à un régime lent de circulation générale dans la stratosphère, dans lequel l'air s'élève graduellement sous les tropiques, se déplace vers les pôles, puis s'enfonce lentement sur ceux-ci (figure 7). À mesure que l'air descend sur les pôles, il se comprime et se réchauffe. L'énergie

qui régit cette circulation provient d'ondes planétaires qui remontent de la troposphère. Les ondes planétaires sont causées par des perturbations atmosphériques à grande échelle, elles-mêmes dues aux variations de la façon dont les terres, l'eau et les divers types de surface des terres influent sur le réchauffement et le mouvement de l'air. Elles ont tendance à être plus vigoureuses dans l'hémisphère Nord, parce qu'il présente une plus grande masse terrestre, ce qui fait que la stratosphère est en moyenne plus chaude sur l'Arctique que sur l'Antarctique.

Les ondes planétaires influent aussi sur la stabilité d'un phénomène appelé « vortex polaire ». Les vortex polaires sont des systèmes de vents qui circulent autour des pôles pendant l'hiver; ils isolent la stratosphère polaire, empêchant l'air plus chaud et l'ozone des

latitudes inférieures d'y entrer. En raison de cette barrière, la zone située à l'intérieur du vortex devient un milieu extrêmement favorable à la formation de PSC et à un appauvrissement rapide de l'ozone. Avant de se dissiper au printemps, cependant, le vortex peut à l'occasion se briser sous l'effet de fortes ondes planétaires, ce qui permet un apport temporaire d'air plus chaud qui rend les conditions moins propices à une destruction rapide de l'ozone. L'action des ondes planétaires étant plus forte dans l'hémisphère Nord, le vortex de l'Arctique a tendance à être moins stable que celui de l'Antarctique. C'est pourquoi l'Arctique n'a pas encore connu de trous massifs de l'ozone comme ceux qui se forment régulièrement sur l'Antarctique au printemps.

Les études réalisées avec des modèles du climat indiquent cependant que le réchauffement de

Figure 7. Dans la stratosphère, l'air s'écoule de l'équateur vers le pôle, son mouvement étant largement régi par la force d'ondes créées par les tempêtes de la troposphère. L'air gagne généralement la stratosphère à l'équateur, où la surface chaude engendre des courants ascendants et orages forts. La tropopause, limite entre les deux couches, disparaît aux pôles pendant l'hiver, ce qui permet à l'air de la stratosphère de s'enfoncer dans la troposphère. Bien que la tropopause ait tendance à bloquer le mouvement de l'air entre la troposphère et la stratosphère, il se produit aussi des échanges d'air dans les deux directions aux latitudes moyennes et dans les régions polaires, sous l'effet des ondes planétaires. Lorsque ces ondes se brisent dans la basse stratosphère, il se crée une « zone de déferlement » où survient un certain brassage de l'air.

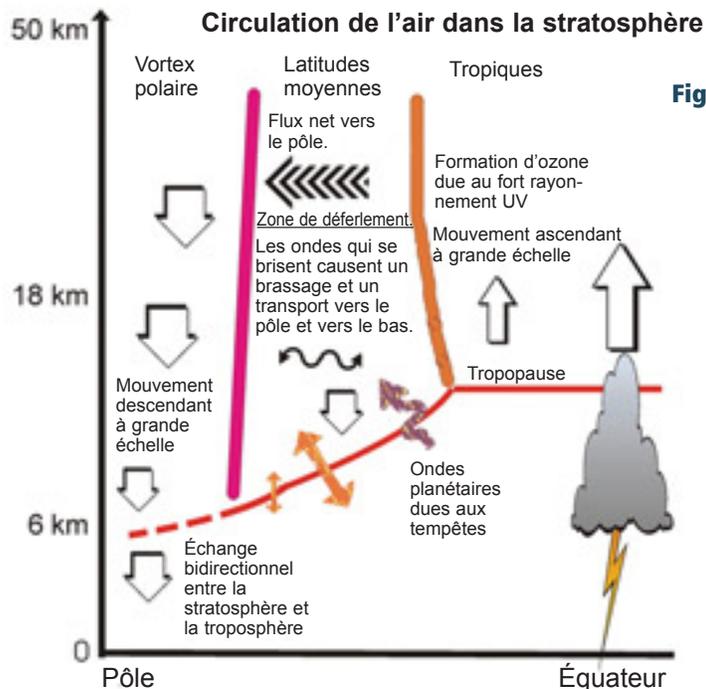


Figure 7

l'atmosphère à proximité de la surface de la Terre et les changements de la circulation ainsi induits pourraient affaiblir les mouvements de ces ondes planétaires, et donc leur effet de réchauffement sur la stratosphère polaire. Si c'était le cas, il s'ensuivrait un renforcement de l'appauvrissement de l'ozone aux deux pôles, mais surtout au-dessus de l'Arctique. Cette situation ralentirait le rétablissement de la couche d'ozone que devrait permettre dans les prochaines décennies la baisse des concentrations stratosphériques de composés destructeurs de l'ozone.

Les recherches révèlent aussi des mécanismes par le biais desquels des changements de la composition de la stratosphère peuvent influencer sur le mouvement de l'air dans la troposphère. Les météorologistes savent depuis longtemps que les régimes de la pression atmosphérique à la surface de la Terre varient avec le cycle des taches

solaires, mais ils ont eu de la difficulté à expliquer cette connexion, puisque la production totale d'énergie du Soleil ne varie que d'environ 0,1 % sur la totalité du cycle. Des études récentes ont cependant montré que la variation de la production d'énergie solaire est beaucoup plus importante dans la partie UV-C du spectre, et peut atteindre jusqu'à 10 % sur le cycle. Il s'agit là d'une fluctuation suffisante pour avoir un effet notable sur l'abondance de l'ozone dans la stratosphère, que les études ont révélé être d'environ 1,5 % plus élevée au maximum du cycle (lorsque le nombre de taches solaires est le plus grand) qu'à son minimum (nombre de taches le plus bas). Ces changements des abondances de l'ozone entraînent des changements correspondants de la température de la stratosphère, qui à leur tour induisent des modifications de la pression et de la circulation atmosphériques.

De récentes simulations informatiques effectuées au Goddard Institute for Space Studies de la NASA ont montré que des changements dans la circulation stratosphérique peuvent aussi influencer sur le flux descendant d'énergie dans la troposphère, où il peut avoir une incidence sur les régimes de pression et de circulation. Ces changements peuvent modifier la position du courant-jet, qui régit la trajectoire des systèmes météorologiques dans la troposphère, et dont un faible décalage peut modifier considérablement les climats régionaux. Des études initiales menées à l'aide de modèles, par exemple, suggèrent que les augmentations d'abondance de l'ozone stratosphérique pourraient diriger davantage de tempêtes vers le Canada. Il faudra cependant poursuivre les travaux pour déterminer par quels mécanismes l'appauvrissement à long terme de la couche d'ozone affecte les régimes météorologiques en surface.

Smog sur la vallée du bas Fraser



La chimie de l'atmosphère

L'appauvrissement de l'ozone est largement une question de chimie de l'atmosphère, mais les processus chimiques jouent aussi un rôle important dans le changement climatique, surtout dans la formation et la dissociation de certains gaz à effet de serre. La chimie de l'appauvrissement de l'ozone et celle du changement climatique ont des interactions significatives sur au moins deux plans.

L'une prend place par le biais de la photochimie – des processus chimiques qui sont régis par l'énergie du Soleil. Nombre des principales réactions en jeu dans l'atmosphère sont de cet ordre, et la quantité d'ozone présente dans la stratosphère influe sur la vitesse de ces réactions, parce qu'elle détermine la quantité de rayonnement ultraviolet-B (UV-B) solaire de grande énergie qui atteint l'atmosphère à proximité du sol. Cet état de choses a des répercussions considérables sur le changement climatique, parce que l'ozone au niveau du sol (troposphérique), important gaz à effet de serre et composante du smog, est un produit de la photochimie (figure 8). À mesure que la couche d'ozone s'amincit et

qu'une plus grande quantité de rayonnement ultraviolet atteint la surface de la Terre, les réactions photochimiques qui produisent l'ozone troposphérique peuvent se dérouler avec plus de vigueur. Les valeurs moyennes de l'ozone au-dessus du Canada sont actuellement d'environ 6 % inférieures à celles d'avant 1980. Les scientifiques estiment que cette baisse a entraîné une augmentation d'environ 7 % de la quantité de rayonnement UV-B qui atteint la surface de la Terre. Une recherche effectuée récemment à l'aide d'un modèle informatique indique qu'un accroissement du rayonnement UV causera une augmentation de l'ozone troposphérique dans les régions urbaines polluées, où l'on rencontre des concentrations élevées d'oxydes d'azote, de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures.

L'autre lien fait intervenir un composé hautement réactif de courte durée de vie, le radical hydroxyle (OH), qui est produit par la dissociation photochimique de l'ozone en présence de vapeur d'eau. OH est un capteur atmosphérique qui réagit avec de nombreux polluants et les extrait de l'atmosphère. Ces

polluants sont entre autres le méthane, un gaz à effet de serre, le méthylchloroforme, un destructeur de l'ozone, et d'autres gaz, comme les hydrochlorofluorocarbures (HCFC) et les hydrofluorocarbures (HFC), qui sont à la fois des destructeurs de l'ozone et des gaz à effet de serre. De plus, OH réagit avec une foule d'autres polluants, dont le monoxyde de carbone, les composés organiques volatils, et divers oxydes d'azote. Certains craignent que la demande en radical hydroxyle dans une atmosphère très polluée ne fasse baisser les concentrations de OH, ce qui réduirait l'efficacité avec laquelle le méthane et divers composés destructeurs de l'ozone sont retirés de l'atmosphère. Un ralentissement de l'élimination de ces composés intensifierait le processus du changement climatique et ralentirait le rétablissement de la couche d'ozone. Bien qu'il soit impossible d'estimer avec un degré élevé de certitude l'abondance planétaire du radical hydroxyle, certaines indications récentes suggèrent que les concentrations de OH ont subi une baisse significative dans les années 1990 et qu'on peut s'attendre à ce que la situation se poursuive dans les dix prochaines années.

Figure 8

Source : Ministère de l'Environnement de l'Ontario (ozone) et Environnement Canada (Indice UV)

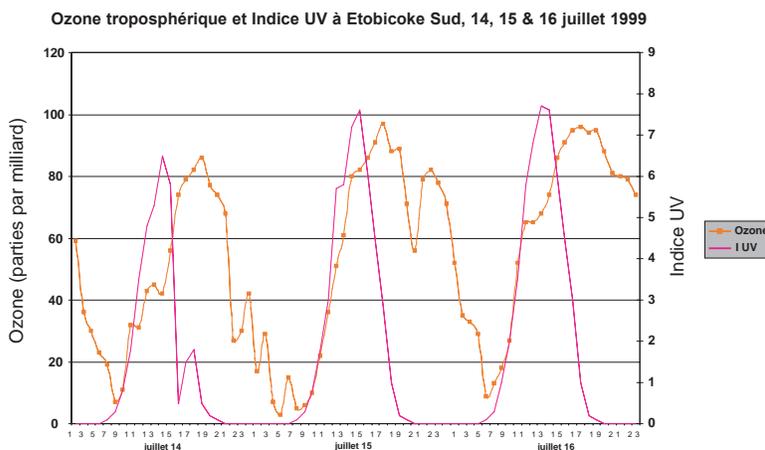


Figure 8. Le rayonnement ultraviolet-B fournit de l'énergie aux réactions chimiques qui conduisent à la formation d'ozone troposphérique, qui est à la fois un important composant du smog et un gaz à effet de serre. Les mesures prises pendant un épisode de smog à Toronto en juillet 1999 montrent une étroite relation entre les niveaux d'UV et les concentrations d'ozone troposphérique. Les modèles informatiques suggèrent que des niveaux élevés d'UV-B pourraient entraîner une augmentation de la formation d'ozone troposphérique dans les régions très polluées. Cette augmentation non seulement aggraverait les problèmes de smog, mais aussi ajouterait au réchauffement par effet de serre.



Les liens biogéochimiques : impact de l'augmentation du rayonnement UV

Tant les modifications du climat que les changements de l'intensité du rayonnement ultraviolet peuvent avoir des impacts considérables sur les processus biologiques, géologiques, chimiques et physiques qui régissent les échanges de matière et d'énergie entre les principaux compartiments de l'environnement - l'atmosphère, la biosphère, l'hydrosphère et la lithosphère. Le mieux connu de ces échanges est probablement le cycle du carbone, dans lequel le carbone circule continuellement entre l'atmosphère, les océans, les organismes vivants, et les roches et les sols, allant d'une forme presque totalement élémentaire, comme le charbon de bois ou la houille, à un gaz simple comme le dioxyde de carbone, ou à l'un des nombreux composés organiques lorsqu'il passe d'un réservoir environnemental à un autre.

Le cycle du carbone est un élément essentiel dans le problème du changement climatique; en effet, la perturbation du cycle naturel du carbone par l'homme, avec la

combustion de combustibles fossiles et le déboisement, est largement responsable de l'actuelle augmentation des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone, le gaz à effet de serre anthropique le plus abondant. En ce qui concerne l'atmosphère, un des liens les plus importants dans le cycle du carbone est ce qu'on appelle la « pompe biologique » aquatique. Il s'agit du processus par lequel le plancton (les plantes et animaux microscopiques qui vivent près de la surface des océans et des lacs) extrait le carbone de l'air et, après sa mort, le dépose sur le fond de ces océans et lacs. Or, l'amincissement de la couche d'ozone, en particulier les épisodes graves comme les trous d'ozone printaniers en Antarctique, pourrait menacer sérieusement ce processus, parce que le plancton ne peut pas s'abriter du rayonnement solaire. Une baisse considérable de l'abondance du plancton consécutive à l'exposition à un rayonnement ultraviolet plus intense pourrait donc faire baisser la vitesse à laquelle le dioxyde de carbone est retiré de l'atmosphère.

De même, les changements biologiques déclenchés par les

modifications du climat pourraient influencer sur l'appauvrissement de l'ozone. Le chlorure de méthyle et le bromure de méthyle, par exemple, sont deux substances destructrices de l'ozone que l'on cesse graduellement de produire et d'utiliser, en application du Protocole de Montréal. Cependant, comme les sources naturelles de ces gaz sont plus importantes que les sources industrielles, tout facteur influant sur les écosystèmes et les processus naturels qui produisent ces gaz pourrait aussi avoir des incidences sur la couche d'ozone. Il reste beaucoup à apprendre sur ces sources naturelles, mais les marais côtiers semblent être des contributeurs importants. Les champignons, des cultures comme le colza, et les sols riches en matière organique sont aussi soupçonnés d'en être des sources considérables. Le réchauffement de l'atmosphère et des océans, ou un changement du niveau marin, pourrait avoir un impact sur toutes ces sources en modifiant les écosystèmes et les conditions climatiques qui régissent la production naturelle de ces gaz. Le changement climatique pourrait aussi influencer sur la vitesse à laquelle ces gaz sont retirés de l'atmosphère par les océans. Les études de la production et de l'extraction naturelles de ces gaz en sont cependant à leurs tout débuts, et il n'est pas encore possible de prédire comment le changement climatique pourrait modifier leurs abondances dans l'atmosphère.



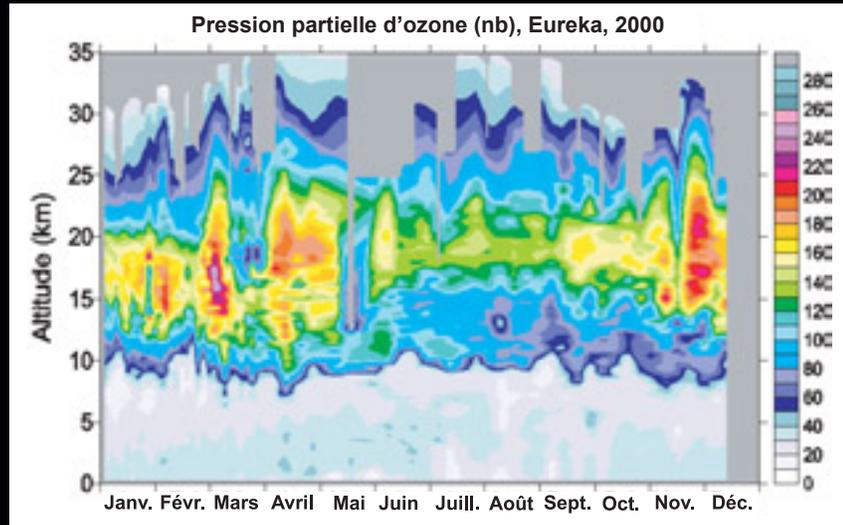


Figure 9

Figure 9. Les données d'ozonosondage recueillies à Eureka en 2000 montrent le cycle annuel de l'ozone, les niveaux les plus élevés survenant en hiver et au début du printemps, et les plus bas en été. Le graphique montre aussi des niveaux d'ozone inhabituellement bas à la fin de mars et au début d'avril aux altitudes d'environ 15 à 20 km. On pense que la présence de cette zone d'appauvrissement est due à des niveaux élevés de chlore et de brome dans une stratosphère arctique très froide.

Figure 10. À l'observatoire d'Environnement Canada situé à Alert, sur l'île d'Ellesmere, dans le haut-Arctique, on surveille quotidiennement les concentrations de fond de gaz à effet de serre, de substances destructrices de l'ozone et d'aérosols.

Figure 10



La recherche et la surveillance au Canada

Avec sa Division des études expérimentales, la Direction de la recherche sur la qualité de l'air d'Environnement Canada est engagée dans diverses activités qui aident à mieux comprendre l'appauvrissement de l'ozone et ses interactions avec le changement climatique. Certaines de ces activités sont des projets de recherche conçus pour acquérir de nouvelles connaissances sur les composants et processus de l'atmosphère. D'autres sont des programmes de surveillance à long terme visant à fournir un long enregistrement continu des conditions atmosphériques qui puisse constituer une base fiable pour identifier les tendances et changements dans la composition et le comportement de l'atmosphère. Ces activités, qui aident aussi à évaluer l'efficacité des mesures adoptées en application du Protocole de Montréal et à élaborer des stratégies pour l'avenir, sont menées par le biais d'installations et programmes clés.

Surveillance de l'ozone depuis le sol et ozonsondes

Depuis les années 1950, des scientifiques canadiens utilisent des instruments au sol pour mesurer les quantités d'ozone total. Les mesures sont actuellement faites à 12 sites répartis sur le territoire du Canada, avec le spectrophotomètre d'ozone Brewer, un appareil développé au Canada. Trois de ces instruments sont installés dans le haut-Arctique, à Resolute Bay, Eureka et Alert. Le réseau Brewer est une source fondamentale d'information sur les changements de l'état de la stratosphère. Sur un plan plus pratique, il fournit aussi des données qui sont utilisées pour produire les prévisions et rapports de l'indice UV.

Ces mesures au sol sont complétées

par les données recueillies par de petits capteurs emportés par ballon, les ozonsondes. D'un poids d'environ 3 kg, ces nacelles instrumentées fournissent des mesures en continu des concentrations d'ozone jusqu'à une altitude de quelque 20 km (*figure 9*).

Observatoires de l'Arctique

En 1992, Environnement Canada a construit l'Observatoire de l'ozone stratosphérique du haut-Arctique, près de la station météorologique d'Eureka, sur l'île d'Ellesmere. L'observatoire est le principal centre de recherche atmosphérique dans l'Arctique, et un élément de premier rang du Réseau pour la détection de changements stratosphériques, un ensemble international de stations au sol de grande qualité qui mesurent l'état physique et chimique de la stratosphère. L'observatoire d'Eureka est équipé d'instruments qui mesurent l'ozone, le dioxyde d'azote, et d'autres substances jouant un rôle important dans la chimie de l'atmosphère. Le Canada exploite, à Alert, sur l'île d'Ellesmere également, un autre observatoire (*figure 10*) qui assure une surveillance continue des concentrations de fond de gaz à effet de serre, de substances destructrices de l'ozone, et d'aérosols (particules en suspension dans l'atmosphère). L'analyse de ces données fournit des informations sur la variabilité à long terme de ces substances et aide à mieux comprendre l'impact des activités humaines sur l'atmosphère.

L'observatoire d'Alert est une station de référence officielle du programme Veille de l'atmosphère du globe (VAG) de l'Organisation météorologique mondiale; il y a une vingtaine de ces stations réparties sur la planète. L'objectif de la VAG est de

rendre disponibles les mesures des concentrations de fond actuelles de certains éléments de l'atmosphère et des conditions physiques qui les accompagnent, pour toutes les grandes régions du globe. Le programme canadien de référence (Canadian Baseline Program) a débuté à Alert en 1975, avec des mesures simples du dioxyde de carbone. Il a ensuite été élargi et, en 1998, incluait des mesures d'autres gaz à effet de serre, comme le méthane, l'ozone et les chlorofluorocarbures.

Études sur le rayonnement (observatoire de Bratt's Lake)

L'observatoire de Bratt's Lake, situé à environ 20 km au sud de Regina, est le volet canadien du Réseau de référence pour la mesure du rayonnement en surface du Programme mondial de recherche sur le climat. Ce réseau se compose d'une quarantaine de stations, réparties sur les sept continents, qui effectuent des mesures très précises du rayonnement solaire et infrarouge (*figure 11*). Étant donné que c'est l'énergie du rayonnement solaire de courte longueur d'onde et du rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde émis par la surface de la Terre et l'atmosphère qui régissent le système climatique de la Terre, cette information peut donner des indications de la manière dont les changements des flux d'énergie radiative influent sur le changement climatique aux échelles régionale et planétaire. L'observatoire de Bratt's Lake, qui fonctionne depuis le milieu des années 1990, fournit aux chercheurs un milieu relativement non pollué dans une région où le climat devrait changer significativement avec l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre.

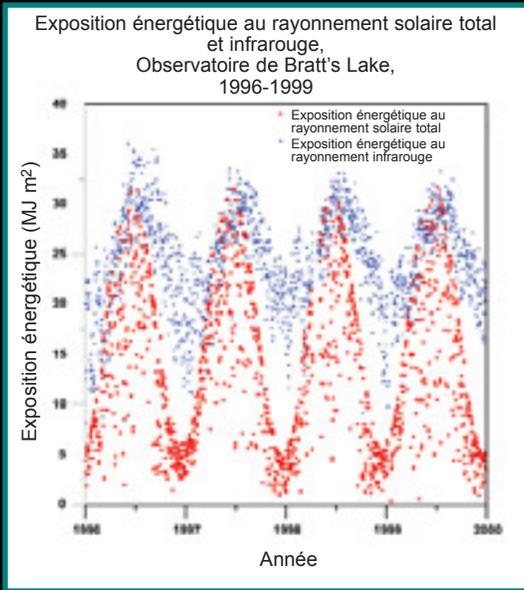


Figure 11
Source : B. Arthur, Environnement Canada

Figure 11. Les mesures des quantités quotidiennes de rayonnement solaire et infrarouge qui atteignent la surface de la Terre devraient permettre de détecter des tendances temporelles. Le pointage de 4 ans présenté ici montre peu de changement, que ce soit du rayonnement solaire ou du rayonnement infrarouge, d'un été à l'autre. Au cours des 4 hivers, cependant, le rayonnement solaire a diminué et le rayonnement infrarouge augmenté. Ces changements peuvent être dus à une augmentation de la couverture nuageuse en hiver. Il faudra toutefois disposer de bien plus d'années de données avant qu'on puisse déterminer si cette situation s'inscrit dans une tendance à long terme ou est simplement due à la variabilité naturelle à court terme du climat.

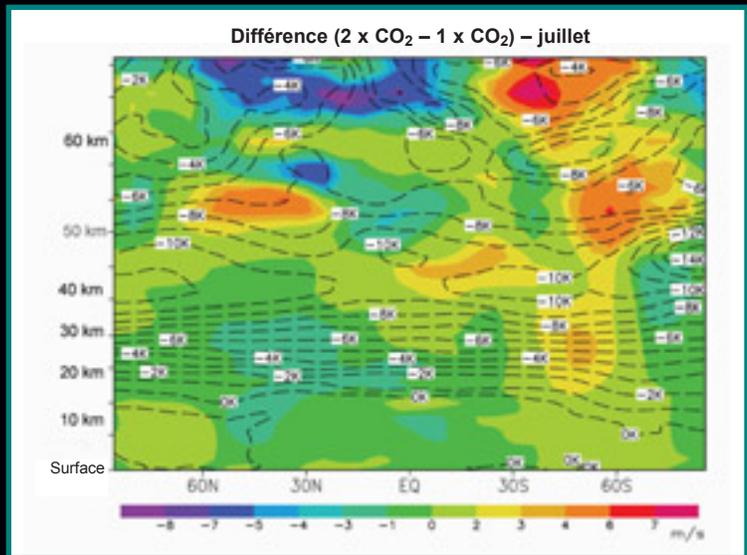


Figure 12
Source : de Grandpré 2001

Figure 12. Bien que l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre entraîne un réchauffement à la surface de la Terre, elle peut causer un refroidissement dans la stratosphère. Le graphique présenté ici montre les effets potentiels d'un doublement des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone sur les températures et les vents stratosphériques pendant l'été, tels que les estime le modèle canadien de l'atmosphère moyenne. Les changements de la température sont indiqués par les lignes tiretées en degrés Kelvin (1 °K est égal à 1 °C, mais l'échelle Kelvin commence au zéro absolu, soit -273 °C). Les changements de la vitesse des vents sont indiqués par les couleurs. Le modèle montre que le refroidissement le plus marqué survient près du sommet de la stratosphère, et que la baisse des températures dans la haute stratosphère au-dessus de l'Antarctique peut atteindre 14 °K.

Figure 13. Ce graphique montre les quantités quotidiennes moyennes de rayonnement ultraviolet-B reçues à Toronto, Edmonton et Churchill pour chaque année depuis 1965. Les valeurs pour la fin des années 1980 sont dérivées de mesures réelles. Les valeurs antérieures sont des estimations dérivées d'informations météorologiques connexes par un modèle statistique. Les quantités d'UV-B commencent à augmenter considérablement à tous les endroits au début des années 1980, peu après le moment où l'on pense que la couche d'ozone a commencé à s'appauvrir. L'augmentation constatée à Churchill a cependant été plus élevée qu'aux deux autres sites; on pense que cette situation est due à des facteurs climatiques, mais il n'est pas encore certain que ceux-ci soient liés à un changement climatique à long terme.

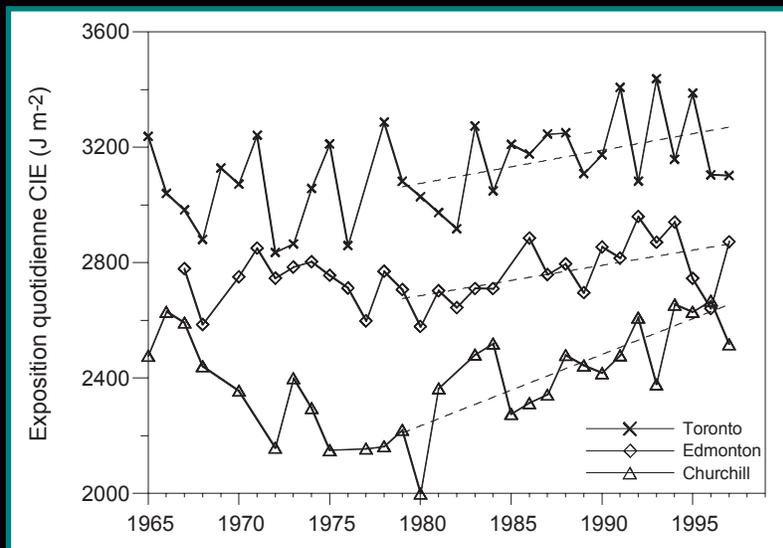


Figure 13
Source : V. Fioletov, Environnement Canada

Recherche sur l'ozone à l'aide de ballons instrumentés

Depuis 20 ans, Environnement Canada collabore avec l'Agence spatiale canadienne et des partenaires des universités et de l'industrie pour recueillir des données sur les composés azotés réactifs, les composés chlorés et bromés, l'ozone, les aérosols et d'autres substances qui jouent un rôle clé dans la chimie de la haute troposphère et de la stratosphère. Ces travaux sont coordonnés via le programme d'évaluation des tendances de l'azote dans l'atmosphère moyenne (Middle Atmosphere Nitrogen Trend Assessment, ou MANTRA). La collecte des données est effectuée à l'aide d'énormes ballons de polyéthylène, d'une hauteur d'environ 20 étages, qui emportent des instruments jusqu'à des altitudes de 30 à 40 km en général. Les instruments balaient l'horizon terrestre à diverses altitudes et enregistrent les spectres produits par la diffusion de la lumière solaire. À la fin du vol, la charge utile instrumentée se sépare du ballon et redescend, freinée par un parachute, jusqu'à la surface, où elle peut être récupérée. L'analyse des données enregistrées fournit alors des informations sur la composition chimique de l'atmosphère à différentes altitudes. L'information recueillies lors des vols MANTRA non seulement contribue à améliorer la compréhension des processus stratosphériques, mais aussi aide les gouvernements à déterminer l'efficacité des mesures visant les substances destructrices de l'ozone qui ont été mises en place en application du Protocole de Montréal.

Modèle canadien de l'atmosphère moyenne

La modélisation informatique est pour les chercheurs un outil impor-

tant qui les aide à améliorer leur compréhension des processus atmosphériques, à étudier l'impact des changements naturels et anthropiques survenus dans l'atmosphère, et à faire des prédictions à long terme des changements à venir. Le modèle canadien de l'atmosphère moyenne (MAM), développé conjointement par des scientifiques d'Environnement Canada et des universités, fournit une représentation sophistiquée des grands processus physiques et chimiques en jeu dans la haute troposphère et la stratosphère. Il a récemment été utilisé pour étudier la façon dont changerait l'atmosphère moyenne si la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone était du double des valeurs actuelles. Les résultats de cette étude suggèrent qu'un accroissement du dioxyde de carbone entraînera indirectement un refroidissement de l'atmosphère moyenne, puisque les autres régions de l'atmosphère émettront davantage de rayonnement vers l'espace. Ces résultats concordent avec les observations effectuées ces dernières décennies, qui montrent une tendance au refroidissement dans certaines parties de l'atmosphère moyenne. Même si l'on estime que la plus grande partie du refroidissement observé dans la stratosphère est imputable à l'appauvrissement de la couche d'ozone, une partie pourrait cependant être due à l'augmentation des concentrations de dioxyde de carbone (figure 12). Les résultats montrent aussi des changements faibles mais significatifs de la distribution de l'ozone dans l'atmosphère moyenne, qui sont dus à l'accroissement du dioxyde de carbone.

UV – climatologie et recherche

Les mesures de l'intensité du rayonnement UV qui atteint la surface de la Terre ne sont prises de façon régulière au Canada que depuis l'introduction du spectrophotomètre Brewer, à la fin des années 1980. Lorsque, dix ans plus tard, les chercheurs d'Environnement Canada ont entrepris d'estimer les tendances à long terme du rayonnement UV, l'enregistrement était encore trop court pour qu'on puisse en tirer des résultats fiables. Pour surmonter ce problème, ils ont développé des modèles statistiques qui estiment l'irradiance UV à l'aide d'une combinaison de données antérieures sur le rayonnement solaire, les niveaux d'ozone total, la température du point de rosée et le couvert nival. C'est ainsi qu'ils ont estimé que l'intensité du rayonnement UV atteignant la surface de la Terre a augmenté en moyenne de 7 % sur le Canada depuis la fin des années 1970, époque où semble avoir commencé l'amincissement de l'ozone.

L'étude montre aussi la possibilité d'une influence du climat sur les régimes du changement des UV au Canada (figure 13). Lorsque l'on a comparé les résultats pour différents endroits du pays, l'augmentation des UV s'est révélée beaucoup plus importante à Churchill qu'à Edmonton ou à Toronto. Cette différence est probablement imputable aux variations de la réflectivité de la surface dues aux augmentations de la couverture nivale et aux diminutions de la couverture nuageuse. Ces changements peuvent, à leur tour, être le reflet d'un décalage de position moyenne du courant-jet polaire.



Les implications pour les politiques

Grâce au Protocole de Montréal, signé en 1987, et aux divers amendements qui lui ont été apportés depuis, les concentrations de CFC, de halons et d'autres importantes substances appauvrissant la couche d'ozone (SACO) sont maintenant en train de baisser. On peut penser que, à mesure qu'elles continueront de décroître pendant le prochain siècle, les effets de l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique sur le changement climatique commenceront à s'atténuer. Si le Protocole est pleinement respecté, les concentrations de SACO à la fin du présent siècle devraient avoir baissé au point de ne plus constituer une menace significative pour la couche d'ozone. Cependant, il est peu probable que l'on en arrive à une observance totale du Protocole; il est donc presque certain que le rétablissement de la couche d'ozone demandera plus de temps. Les effets de l'appauvrissement de l'ozone sur le changement climatique vont aussi durer plus longtemps si les CFC sont remplacés par des substituts tels que les hydrofluorocarbures (HFC), qui sont de puissants gaz à effet de serre. L'effet de serre dû à ces substances viendrait en outre s'ajouter à celui des substances destructrices de l'ozone plus anciennes encore présentes dans l'atmosphère.

Bien que les concentrations atmosphériques de SACO soient à la baisse, celles d'importants gaz à effet de serre, comme le dioxyde de carbone et le méthane, qui n'ont pas de lien direct avec l'appauvrissement de l'ozone, continuent

de s'accroître. Or, des concentrations plus élevées de ces gaz peuvent avoir pour effet d'allonger le temps de rétablissement de la couche d'ozone, surtout à cause de leurs effets sur le refroidissement de la stratosphère et donc sur la formation de nuages stratosphériques polaires. De récentes simulations informatiques appuient cette idée, et suggèrent que, avec les augmentations prévues des concentrations de gaz à effet de serre, le grave appauvrissement de l'ozone aux pôles pourrait durer 10 à 20 ans de plus que si les concentrations de gaz à effet de serre étaient restées aux niveaux antérieurs. Ces études sont cependant très préliminaires, et il faudra procéder à de nouveaux travaux, avec des modèles plus raffinés.

Sous l'angle des politiques, il est clair que les actions visant à atténuer le réchauffement planétaire peuvent avoir des effets positifs sur l'appauvrissement de l'ozone, et inversement. Il faut cependant veiller à éviter que les solutions à un problème n'aggravent l'autre. Les décideurs et les scientifiques sont déjà aux prises avec ce genre de difficulté quand ils cherchent des remplacements à long terme aux CFC, halons et autres substances destructrices d'ozone dont l'utilisation est graduellement éliminée aux termes du Protocole de Montréal. Les actuelles restrictions sur les HCFC, qui ont un potentiel de destruction de l'ozone plus bas que les CFC

mais sont de puissants gaz à effet de serre, illustrent bien la nécessité de prendre en compte les implications sur les deux aspects de la question.

Mais il reste d'autres problèmes. En particulier, que devrions-nous faire face aux HFC et autres gaz à effet de serre que l'on vante présentement en tant que remplacements des CFC et des HCFC? Bien que leurs concentrations dans l'atmosphère soient encore relativement faibles, on peut s'attendre à ce qu'elles montent significativement avec le temps si l'utilisation de ces substances n'est pas réglementée. La position adoptée par le Canada est que l'on ne devrait utiliser des HFC que pour remplacer des substances destructrices de l'ozone. Le Canada veut aussi que les émissions de HFC soient réglementées : récupération et recyclage obligatoires, élimination sécuritaire et autres mesures de limitation. Lors de la dixième Réunion des Parties au Protocole de Montréal et de la quatrième Conférence des Parties à la Convention-cadre sur les changements climatiques, il a été demandé aux autorités techniques et scientifiques des deux ententes de fournir une orientation en vue de limiter les émissions de HFC et autres gaz à effet de serre qui pourraient être utilisés en remplacement des CFC. Cette étude des options est en cours.



À l'observatoire de Bratt's Lake, le spectrophotomètre Brewer (au premier plan) mesure le rayonnement ultraviolet et l'épaisseur de la couche d'ozone, et les suiveurs solaires mesurent le rayonnement solaire diffus.

Les recherches nécessaires

Pour ce qui est des recherches, elles devront enrichir les connaissances sur la manière dont interagissent la troposphère et la stratosphère. Parmi les plus importantes questions présentement étudiées figurent les suivantes :

- *Quels sont les principaux mécanismes de couplage entre la troposphère et la stratosphère, et comment influent-ils sur le climat?* Nous savons, par exemple, que la structure thermique verticale de la troposphère est sensible aux changements de celle de la stratosphère. Nous savons aussi que des ondes se propageant vers le haut à partir de la troposphère montent jusque dans la stratosphère et y influent sur les températures et sur la circulation. De même, des ondes nées dans la stratosphère peuvent se propager vers le bas, et influencer sur les conditions météorologiques dans la troposphère. En étudiant plus avant ces mécanismes, nous améliorerons notre compréhension de la façon dont les conditions qui règnent dans la stratosphère ont une incidence sur le climat dans la troposphère, et réciproquement.
- *Comment les changements des structures thermiques verticales de la troposphère et de la stratosphère influent-ils sur le climat?* Depuis 30 ans, les chercheurs constatent un refroidissement de la stratosphère et un réchauffement de la basse troposphère. Ces changements pourraient faire varier la hauteur de la tropopause, qui est la limite entre la troposphère et la stratosphère. Cette variation pourrait à son tour influencer sur la hauteur des courants de convection au sein de la troposphère, comme ceux qui accompagnent les orages, et donc possiblement sur l'intensité de ceux-ci. Elle pourrait aussi modifier les positions des courants-jets sur la planète, et donc le déplacement des systèmes météorologiques.

- *Comment les changements des concentrations d'aérosols dans la troposphère influenceront-ils sur la quantité de rayonnement solaire qui atteindra la surface de la Terre?* Les aérosols sont de minuscules particules et gouttelettes en suspension dans l'atmosphère, qui proviennent de sources naturelles ou anthropiques. Pendant la plus grande partie du XX^e siècle, les activités industrielles ont considérablement fait monter la charge atmosphérique d'aérosols, surtout de sulfates. Comme les sulfates sont à l'origine des pluies acides ainsi que de problèmes de santé humaine, les émissions de ces composés ont été substantiellement réduites en Europe et en Amérique du Nord depuis les années 1970. Bien que, dans d'autres régions du monde, les émissions aient augmenté avec l'industrialisation, on s'attend à ce qu'elles finissent par y diminuer, pour les mêmes raisons. Les aérosols de sulfates réfléchissent le rayonnement solaire vers l'espace, ce qui a un effet de refroidissement à la surface de la Terre, et réduit la quantité d'ultraviolets qui traversent l'atmosphère. À mesure que la quantité d'aérosols sulfatés présents dans l'atmosphère baissera, cependant, le réchauffement en surface pourra augmenter, puisqu'il y aura plus de rayonnement solaire qui y parviendra. De plus, cet accroissement du rayonnement solaire total sera accompagné d'un accroissement du rayonnement ultraviolet atteignant la surface de la planète. Comme le rayonnement ultraviolet contribue à la formation d'ozone troposphérique, qui est à la fois un gaz à effet de serre et un important composant du smog, la réduction des concentrations de sulfates pourrait intensifier encore le réchauffement par effet de serre, et créer des prob-

lèmes de qualité de l'air en bien des endroits.

- *Comment le refroidissement de la stratosphère influera-t-il sur la formation de trous de l'ozone?* Depuis qu'ils ont été découverts en 1985, les trous d'ozone de l'Antarctique sont toujours de plus en plus grands. Celui qui s'est formé en septembre 2000 était, au moment où le présent document a été rédigé, le plus vaste jamais constaté, avec une superficie de 28,3 millions de kilomètres carrés, soit un peu plus que l'Amérique du Nord et un peu moins que l'Afrique (figure 14). Il s'étendait vers le nord jusqu'à la pointe sud de l'Amérique du Sud; Ushuaia (Argentine) et Punta Arenas (Chili), une ville de plus de 100 000 habitants, se sont ainsi trouvées exposées à des niveaux de rayonnement ultraviolet très élevés pour cette époque de l'année. Depuis le début des années 1990, un grave appauvrissement de l'ozone a aussi été détecté à quelques reprises dans la stratosphère de l'Arctique. Au printemps de 2000, par exemple, le niveau d'ozone dans l'Arctique avait baissé de près de 60 % à l'altitude de 18 km. L'appauvrissement de l'ozone sur les pôles devrait s'atténuer avec la diminution de l'abondance de substances destructrices d'ozone dans l'atmosphère, mais les chercheurs ont besoin d'en savoir plus sur la façon dont les changements des concentrations de gaz à

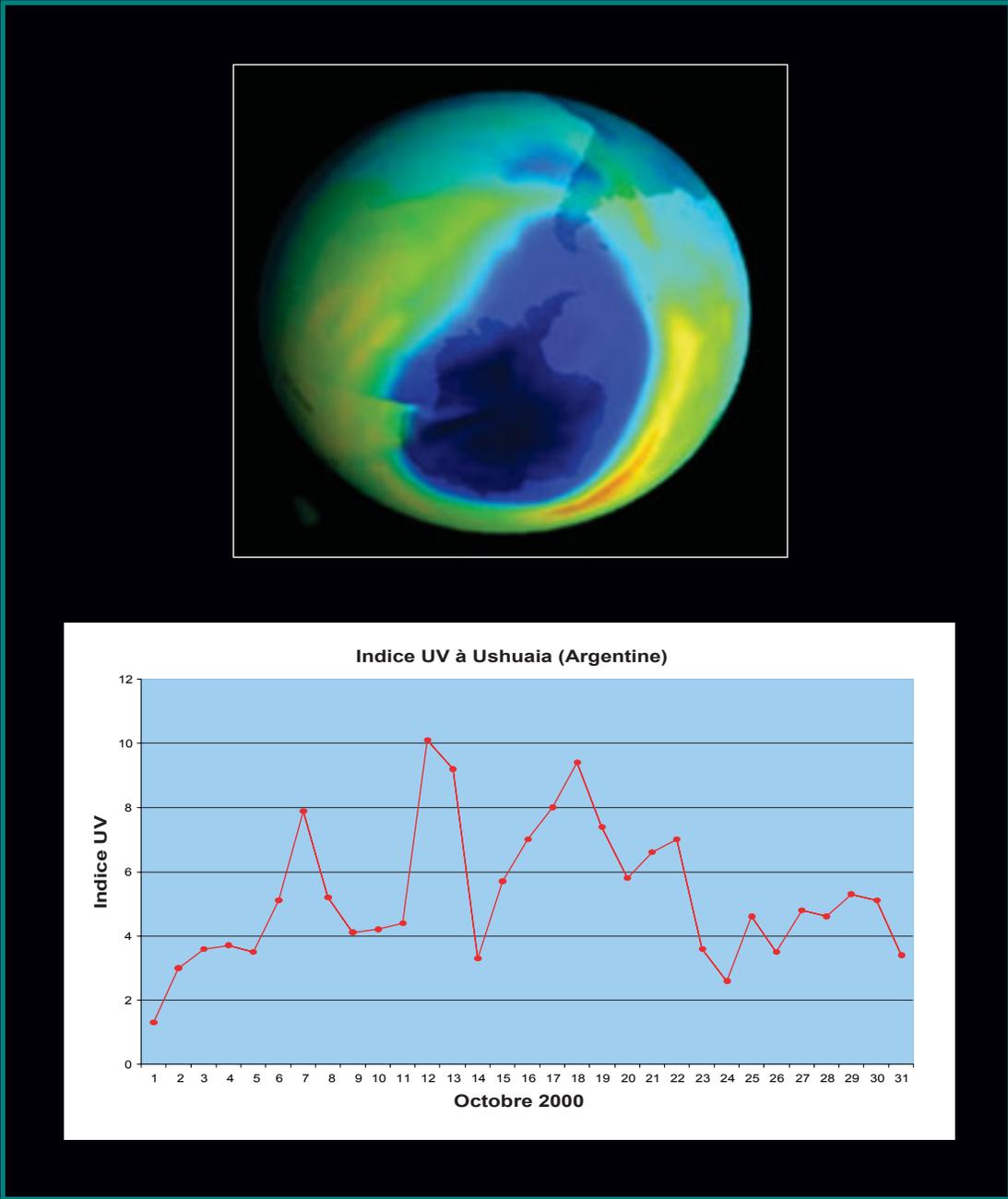


Figure 14

Source : NASA (haut) ; Servicio Meteorologico Nacional, Argentine (bas)

Figure 14. C'est en septembre 2000 que le trou d'ozone de l'Antarctique a atteint son extension maximale de tous les temps, et qu'il s'est étendu pour la première fois au-dessus de grandes régions habitées du sud de l'Amérique du Sud. L'Indice UV à Ushuaia, en Argentine, a été aux environs ou au-dessus de 8 pendant cinq journées différentes, et atteint 10, 1 le 12 octobre. L'Indice UV en octobre à Ushuaia se situe normalement aux alentours de 4. Les valeurs supérieures à 10 ne se rencontrent généralement que dans les régions tropicales.

effet de serre et d'ozone stratosphérique influenceront sur les températures de la stratosphère polaire avant de pouvoir prédire avec confiance les tendances futures de la formation de trous d'ozone.

- *Comment les changements de la quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère influenceront-ils sur le changement climatique et l'appauvrissement de l'ozone?* La vapeur d'eau est le gaz à effet de serre le plus abondant dans l'atmosphère. Dans la stratosphère, la vapeur d'eau des nuages stratosphériques polaires agit également comme un catalyseur qui accentue l'appauvrissement de l'ozone.

Comme l'atmosphère peut retenir plus de vapeur d'eau quand elle est plus chaude, le réchauffement par effet de serre pourrait faire croître la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère, ce qui aurait d'importantes incidences à la fois sur le climat et sur l'appauvrissement de l'ozone. Les scientifiques doivent donc déterminer si la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère est effectivement à la hausse et, si oui, comment elle est répartie entre les diverses régions de l'atmosphère.

- *Quel effet les baisses de la charge atmosphérique de chlore et de brome auront-elles sur le changement climatique et l'appauvrissement de l'ozone?* Avec la baisse des abondances de chlore et de brome dans la stratosphère, les concentrations d'ozone dans cette couche devraient graduellement remonter vers les niveaux naturels. En même temps, cependant, la baisse de l'effet refroidissant de la perte d'ozone et de l'effet réchauffant des gaz à effet de serre destructeurs d'ozone

aura une incidence sur les températures de l'atmosphère. Les données des systèmes de surveillance qui suivent les concentrations de l'ozone et d'autres grandes caractéristiques de l'atmosphère aideront à vérifier que les changements attendus se produisent effectivement et à accroître notre compréhension d'autres changements qui pourraient survenir.

Nombre des initiatives de recherche qui se penchent sur ces aspects et d'autres questions connexes se déroulent dans le cadre du projet Processus stratosphériques et leur rôle dans le climat (en anglais Stratospheric Processes and Their Role in Climate, ou SPARC) du Programme climatologique mondial, projet lancé en 1992. Le projet englobe un certain nombre d'études conçues pour améliorer la compréhension scientifique des connexions physiques, chimiques et radiatives entre la troposphère et la stratosphère, et leurs effets sur le climat. L'actuel programme de recherches de SPARC vise des domaines tels que les indicateurs stratosphériques du changement climatique, la physique et la chimie de l'appauvrissement de l'ozone, l'influence des changements de l'ozone sur le climat, les échanges d'énergie et de gaz entre la troposphère et la stratosphère, et les ondes planétaires.

Un autre important domaine d'activité, dans lequel SPARC est très impliqué, vise à améliorer la manière dont les modèles informatiques de l'atmosphère représentent les grands liens entre l'appauvrissement de l'ozone et le changement climatique. Il s'agit entre autres de mieux représenter la stratosphère dans les modèles de circulation générale utilisés pour étudier le

changement climatique et de mieux reproduire les ondes planétaires. Une fois ces raffinements apportés, non seulement nous connaissons mieux les interactions entre l'appauvrissement de l'ozone et le changement climatique, mais aussi nous comprendrons mieux comment ces liens, en même temps que tous les autres facteurs intervenant dans le changement climatique, influenceront sur l'état futur tant de la couche d'ozone que du climat en surface.

De plus en plus, les actions de la communauté scientifique et de celle des politiques prennent en compte le fait que l'atmosphère ne peut pas être perçue comme une série de compartiments distincts, où les phénomènes se déroulent en vase clos. Au contraire, les chercheurs et les décideurs ont une perspective plus globale de l'atmosphère, la considérant comme un tout dynamique dont l'état à un moment donné dépend d'un réseau complexe d'interactions, non seulement entre ses divers éléments et processus, mais aussi avec ceux d'autres composants de l'écosphère.

Pour bien prendre en compte ces interactions, les scientifiques de l'atmosphère regardent de plus en plus à l'extérieur de leurs propres spécialités et collaborent plus étroitement avec des experts d'autres domaines. L'évolution d'approches plus intégrées à l'appauvrissement de l'ozone et au changement climatique – ainsi qu'à d'autres problèmes atmosphériques – est en train d'accroître notre capacité de comprendre et d'atténuer les énormes changements que les activités humaines ont imposés à l'atmosphère terrestre depuis 200 ans. Non seulement ces approches nous aideront à lutter plus efficacement contre les problèmes d'aujourd'hui, mais aussi elles nous donneront une meilleure chance de prévoir et limiter les autres menaces de l'homme pour l'atmosphère qui pourraient survenir dans l'avenir.



Une approche intégrée aux problèmes atmosphériques s'impose aussi, parce que les écosystèmes et la santé humaine ne sont pas affectés par un seul de ces problèmes, mais bien par tous. L'étonnant déclin des populations d'amphibiens, par exemple, est peut-être imputable à des stress multiples liés aux précipitations acides, aux polluants organiques persistants et à un certain nombre d'autres problèmes de pollution. L'augmentation des niveaux d'UV (due à l'appauvrissement de l'ozone) et des changements de niveau des eaux peu profondes (dus au changement climatique) pourraient aussi être des facteurs de ce déclin, puisqu'ils rendent les œufs d'amphibiens plus susceptibles aux champignons aquatiques, ce qui tue les embryons.



Les connexions

De plus en plus, les actions de la communauté scientifique et de celle des politiques prennent en compte le fait que l'atmosphère ne peut pas être perçue comme une série de compartiments distincts, où les phénomènes se déroulent en vase clos. Au contraire, les chercheurs et les décideurs ont une perspective plus globale de l'atmosphère, la considérant comme un tout dynamique dont l'état à un moment donné dépend d'un réseau complexe d'interactions, non seulement entre ses divers éléments et processus, mais aussi avec ceux d'autres composants de l'écosphère.

Pour bien prendre en compte ces interactions, les scientifiques de l'atmosphère regardent de plus en plus à l'extérieur de leurs propres spécialités et collaborent plus étroitement avec des experts

d'autres domaines. L'évolution d'approches plus intégrées à l'appauvrissement de l'ozone et au changement climatique - ainsi qu'à d'autres problèmes atmosphériques - est en train d'accroître notre capacité de comprendre et d'atténuer les énormes changements que les activités humaines ont imposés à l'atmosphère terrestre depuis 200 ans. Non seulement ces approches nous aideront à lutter plus efficacement contre les problèmes d'aujourd'hui, mais aussi elles nous donneront une meilleure chance de prévoir et limiter les autres menaces de l'homme pour l'atmosphère qui pourraient survenir dans l'avenir.





Bibliographie

- Angell, J.K. 2000. Global, hemispheric, and zonal temperature deviations derived from radiosonde records. In *Trends Online: A Compendium of Data on Global Change*. Oak Ridge, Tennessee: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy.
- Bernard, S.M., J. Samet, A. Grambsch, K. Ebi, and I. Romieu. 2001. The Potential Impacts of Climate Variability and Change on Air Pollution-Related Health Effects in the United States. *Environmental Health Perspectives*, **109**, 199-209.
- Butler, J.H. 2000. Better budgets for methyl halides. *Nature*, **403**, 260-261.
- Fioletov, V.E., B. McArthur, J. Kerr, and D. Wardle. 2000. Estimation of long-term changes in ultraviolet radiation over Canada. *Journal of Geophysical Research*, in press.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 2001. *Climate Change 2001, The Scientific Basis, Summary for Policymakers et Technical Summary of the IPCC WGI Third Assessment Report*. Genève : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.
- Harvey, D. 2000. *Global Warming: The Hard Science*. Toronto: Prentice Hall.
- Labitzke, K and B. Naujokat. 2000. The lower arctic stratosphere in winter since 1952. *SPARC Newsletter*, No. 15, 11-14.
- McArthur, L.J.B., V.E. Fioletov, J.B. Kerr, and D.I. Wardle. 1999. Derivation of UV-A irradiance from pyranometer measurements, *Journal of Geophysical Research*, **104**, 30139-30151.
- Organisation météorologique mondiale, 1999. *Évaluation scientifique de l'appauvrissement de la couche d'ozone : 1998*. Genève : Organisation météorologique mondiale.
- Rhew, R.C., B. Miller, and R.F. Weiss. 2000. Natural methyl bromide and methyl chloride emissions from coastal salt marshes. *Nature*, **403**, 292-295.
- Rind, D., D. Shindell, P. Lonergan, N.K. Balachandran. 1998. Climate change and the middle atmosphere. Part III: The Doubled CO₂ Climate Revisited. *Journal of Climate*, **2**, 876-893.
- Rind, D., R. Suozzo, N.K. Balachandran, and M.J. Prather. 1990. Climate change and the middle atmosphere. Part I: The doubled CO₂ Climate. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **47**, 475-494.
- Shepherd, T.G. 2000. On the role of the stratosphere in the climate system. *SPARC Newsletter*, No 14, 7-10.
- Shindell, D., R. Rind, N. Balachandran, J. Lean, and P. Lonergan 1999. Solar cycle variability, ozone, and climate. *Science*, **284**, 305-308.
- Stahelin, J., N.R.P. Harris, C. Appenzeller, and J. Eberhard. 2001. Ozone trends: A review. *Review of Geophysics*, **39** (2), 231-290.
- Weaver, A., and F.W. Zwiers. 2000. Uncertainty in climate change. *Nature*, **407**, 571-572.



