

L'OZONE DE L'ARCTIQUE : **Sensibilité de la couche d'ozone à** **l'appauvrissement par les substances chimiques et** **au changement climatique**

A. Fergusson et D.I. Wardle

Environnement Canada



Environnement
Canada

Environment
Canada





Publié avec l'autorisation de la ministre de l'Environnement
© Ministère des Travaux publics et Services gouvernementaux Canada, 1998
N° de catalogue EN56-133/1998F
ISBN 0-662-83346-5

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Hans Fast et Jim Kerr, du Service de l'environnement atmosphérique d'Environnement Canada, pour leur précieuse assistance lors de la préparation du manuscrit.

Collaborateur de rédaction : David Francis, Lanark House Communications

Traduction : Marie-France Guéraud, Bureau de la Traduction, Travaux publics et Services gouvernementaux Canada

Conception : BTT Communications

Cover

Couverture avant : Vue aérienne de l'Observatoire de l'ozone stratosphérique d'Eureka, sur l'île d'Ellesmere
(*John Bird*)

Couverture arrière : Un observateur enregistre les données météorologiques à Alert, sur l'île d'Ellesmere
(*Brent Colpitts*).

Couverture arrière (médaillon) : Lancement d'un ballon météorologique à Resolute Bay, sur l'île Cornwallis.

Photographies d'arrière-plan :

Pages vi, 2, et 16 : John Bird

Pages 4, 9, 13, 18, et 22 : Andrew Elford

Pages iv, 12, 14, 20, et 28 : Brent Colpitts

Page 10 : Angus Fergusson

Pages 7, 17, et 26 : Hans Fast

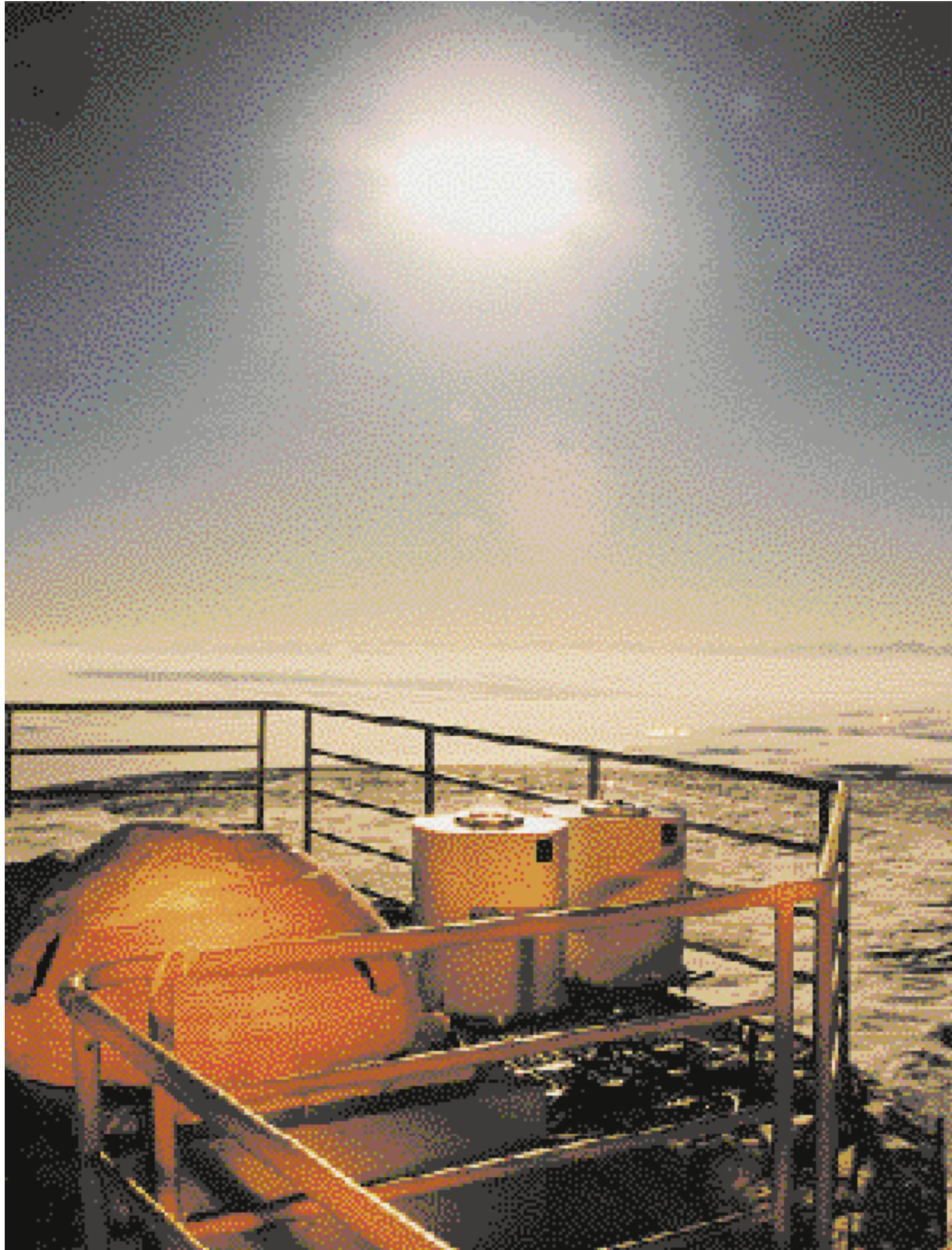
Page 21 : Luc Sarrazin et Greg Sorensen

Sauf indication contraire, toutes les autres illustrations sont d'Environnement Canada.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé.....	1
Introduction.....	3
Le régime naturel de l’ozone et l’Arctique	5
Les substances destructrices de l’ozone et leur impact sur la couche d’ozone de l’Arctique	7
Autres facteurs influant sur l’appauvrissement de l’ozone dans l’Arctique.....	11
Les effets du changement climatique.....	15
Recherches et observations : l’état de la couche d’ozone de l’Arctique.....	19
L’avenir de la couche d’ozone de l’Arctique.....	25
Bibliographie.....	27





R É S U M É

Dans les années 90, l'ozone de l'Arctique a connu des pertes considérables, et l'on craint que, dans les 10 ou 20 prochaines années, les épisodes de grave appauvrissement ne deviennent encore plus fréquents. Au cours de cette période, les concentrations de substances destructrices de l'ozone atteindront leur maximum ou en seront proches, et les changements de la stratosphère arctique causés par le réchauffement planétaire pourraient rendre les conditions plus favorables aux processus d'appauvrissement.

Avec ces graves pertes d'ozone, les quantités de rayonnement ultraviolet atteignant la surface de la Terre seront plus élevées, ce qui pourrait être très nuisible pour les organismes sensibles de l'Arctique. À cause du mélange des masses d'air, les pertes survenant dans l'Arctique pourraient aussi réduire les quantités d'ozone aux latitudes moyennes.

Les importantes pertes observées dans l'Arctique et dans l'Antarctique sont le résultat de conditions particulières qui se produisent dans les régions polaires en hiver et au début du printemps. Dans chaque hémisphère, lorsque l'hiver arrive, il apparaît autour du pôle un vortex de vents qui isole la stratosphère polaire. Sans apport d'air plus doux

des latitudes plus basses et en l'absence de lumière solaire, l'air du vortex devient très froid. À des températures de $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou moins, des nuages composés de glace, d'acide nitrique et d'acide sulfurique commencent à se former dans la stratosphère. Dans ces nuages stratosphériques (ou PSC) prend place une série de réactions chimiques qui détruisent l'ozone beaucoup plus efficacement que celles qui interviennent dans de l'air plus chaud. La destruction de l'ozone commence avec le retour de la lumière solaire au printemps et se poursuit rapidement jusqu'à ce que le vortex se dissipe et que des températures plus élevées empêchent la formation de PSC.

Dans l'Antarctique, ces processus causent régulièrement l'apparition d'un énorme trou dans la couche d'ozone. Dans l'Arctique, cependant, les quantités d'ozone ne sont pas encore tombées aux très bas niveaux observés en Antarctique. Cette situation est due en partie à ce que l'ozone est au départ plus abondant dans l'Arctique, mais elle tient aussi au fait que la circulation atmosphérique, plus variable dans l'hémisphère Nord, y rend le vortex moins stable. Par conséquent, les apports d'air du sud empêchent souvent la stratosphère arctique de

devenir assez froide pour que des PSC puissent s'y former.

L'appauvrissement de l'ozone dans l'Arctique pourrait cependant s'aggraver au cours des prochaines décennies, du fait des changements climatiques causés par l'accroissement des concentrations de gaz à effet de serre comme le CO_2 dans l'atmosphère. Bien que l'accumulation de ces gaz cause un réchauffement à la surface de la Terre, elle contribue aussi au refroidissement de la stratosphère. Comme les températures de la stratosphère arctique se situent souvent à quelques degrés seulement du seuil de formation des PSC, si elle se refroidit davantage, les PSC pourraient être plus fréquents, d'où des pertes d'ozone encore plus graves. Les études préliminaires effectuées avec des modèles de l'atmosphère suggèrent que cet état de choses pourrait retarder de dix ans ou plus un rétablissement de la couche d'ozone de l'Arctique.

Un certain nombre de phénomènes naturels influent aussi sur les valeurs de l'ozone à des échelles de temps allant de la journée à l'année. Ce sont les systèmes météorologiques, l'oscillation quasi biennale (renversement périodique de la direction des vents stratosphériques à l'équateur), les

épisodes El Niño, les légères variations du rayonnement solaire associées au cycle des taches solaires, et les éruptions volcaniques.

Il est essentiel de poursuivre les efforts de recherche et de surveillance pour réduire les incertitudes qui pèsent sur notre compréhension des processus d'appauvrissement et améliorer notre capacité de prédire comment la couche d'ozone réagira à l'évolution future des stress et des conditions atmosphériques. La participation du Canada aux activités de recherche et de surveillance visant l'ozone témoigne de notre préoccupation particulière, en tant qu'État nordique, pour le devenir de la couche d'ozone de l'Arctique.

L'avenir de la couche d'ozone de l'Arctique dépendra essentiellement du succès que nous connaissons pour débarrasser l'atmosphère des substances destructrices de l'ozone, mais aussi de notre capacité de limiter les émissions de gaz à effet de serre. Ces problèmes sont si étroitement liés que nous ne pouvons pas les traiter indépendamment. Au contraire, cette situation montre à quel point il est important d'élaborer une stratégie globale visant à atténuer l'impact de l'homme sur l'atmosphère.



INTRODUCTION

La couche d'ozone de l'Arctique s'est considérablement appauvrie dans les années 90, et les données scientifiques laissent croire qu'elle pourrait devenir encore plus vulnérable au cours des 10 ou 20 prochaines années. L'appauvrissement n'a pas été aussi marqué qu'en Antarctique, où, depuis 1982, des trous d'ozone considérables sont apparus au printemps presque tous les ans, mais il a été beaucoup plus élevé qu'aux

latitudes moyennes (figure 1), et l'on a observé des pertes de l'ordre de 45 %.

Les concentrations atmosphériques de substances destructrices de l'ozone connues ont culminé récemment, ou vont le faire sous peu, mais elles resteront dangereusement proches des valeurs de pointe pendant les prochaines décennies. Ce qui est plus inquiétant, cependant, c'est que les changements climatiques découlant de

l'accumulation de gaz à effet de serre peuvent entraîner des modifications de la stratosphère de l'Arctique qui rendraient les épisodes d'appauvrissement de l'ozone de plus en plus fréquents.

Les écologistes s'inquiètent beaucoup des effets que des pertes importantes de l'ozone pourraient avoir sur la faune et la flore de l'Arctique. Étant donné que, dans cette région, la vie a évolué dans un milieu où les niveaux de rayonnement ultraviolet sont normalement très bas, elle peut être extrêmement sensible à une forte augmentation du rayonnement qui atteint la surface de la Terre pendant les épisodes de grave appauvrissement de la couche d'ozone. Des pertes considérables d'ozone dans l'Arctique peuvent aussi avoir des répercussions dans d'autres régions, le mélange d'air arctique pauvre en ozone avec l'air de régions situées plus au sud abaissant la teneur en ozone de ce dernier. En fait, les régions polaires, où interviennent des processus atmosphériques uniques, peuvent être le facteur déterminant de l'ampleur de l'appauvrissement à l'échelle planétaire.

Le présent document résume les connaissances actuelles sur l'état de

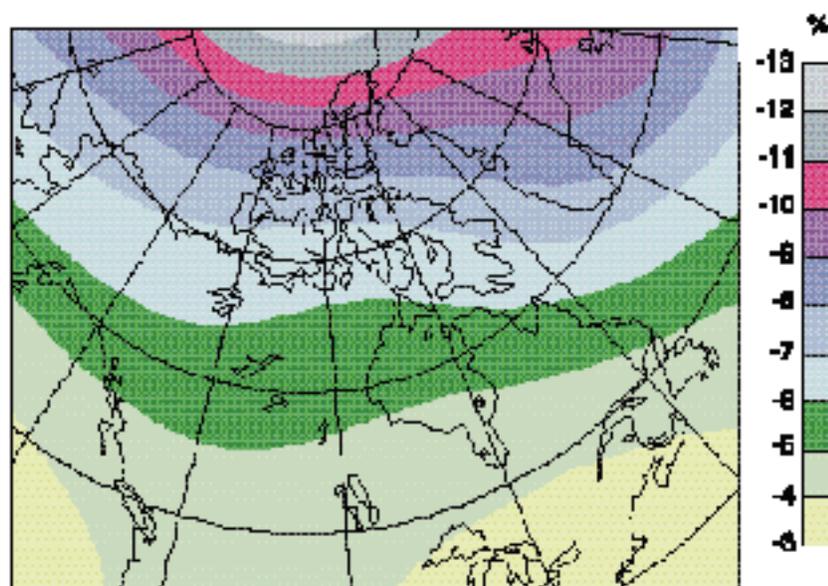


Figure 1

Différences en pourcentage des quantités d'ozone sur le Canada pour la période de janvier à juin de 1987 et celle de 1997. Les pertes d'ozone ont été substantiellement plus élevées sur l'Arctique que sur le sud du Canada.

la couche d'ozone dans l'Arctique et les processus qui la régissent. Certains sont des processus naturels et expliquent les fluctuations normales des quantités d'ozone d'une journée, d'une saison ou d'une année à l'autre. D'autres sont imputables à la présence de polluants destructeurs d'ozone libérés par les activités humaines et entraînent

des changements à long terme de la couche d'ozone. Il existe aussi des relations qui peuvent être cruciales entre la destruction de l'ozone dans l'Arctique et les changements induits dans la stratosphère par le changement climatique. À terme, les réglementations actuelles visant les substances destructrices de

l'ozone devraient permettre de réparer les dommages subis par la couche d'ozone, mais c'est l'interaction complexe entre tous ces éléments qui déterminera si la couche d'ozone de l'Arctique va encore se détériorer beaucoup, avant de revenir à des conditions normales.



LE RÉGIME NATUREL DE L'OZONE ET L'ARCTIQUE

L'ozone se forme dans la stratosphère (couche de l'atmosphère située entre 10 et 50 km au-dessus de la surface de la Terre) lorsque le puissant rayonnement ultraviolet de la lumière solaire dissocie des molécules d'oxygène (O_2), libérant ainsi des atomes d'oxygène (O) qui se combinent ensuite avec des molécules intactes pour donner de l'ozone (O_3). La plus grande partie de l'ozone stratosphérique se forme sous les tropiques, région où le rayonnement ultraviolet pénètre le plus profondément dans l'atmosphère, mais les vents stratosphériques le redistribuent sur le reste de la planète. Par la suite, l'ozone est détruit par le rayonnement solaire ou par des réactions faisant intervenir le chlore, la vapeur d'eau, les oxydes d'azote et d'autres substances présentes dans l'air. Cependant, dans un système naturel non perturbé, il arrive toujours assez de nouvel ozone des tropiques pour compenser ces

pertes. Cela ne signifie pas pour autant que la quantité d'ozone dans la stratosphère soit constante. En fait, elle varie considérablement d'une journée, d'une saison, d'une année et d'un endroit à l'autre; pourtant, en un endroit donné, les niveaux naturels moyens de l'ozone ont tendance à rester sensiblement les mêmes d'une décennie à l'autre.

La quantité d'ozone au-dessus d'un point donné de la surface de la Terre est généralement mesurée en unités Dobson (ou dobsons), 100 dobsons correspondant à 1 mm d'ozone dans les conditions normales de température et de pression à la surface. La plus grande partie de cet ozone se trouve dans la couche d'ozone stratosphérique, mais il y en a aussi un peu à proximité de la surface, qui y a été ramené par les courants provenant de la stratosphère ou s'y est formé sous l'effet de réactions chimiques mettant en jeu des polluants atmosphériques. Les

valeurs annuelles moyennes de l'ozone varient d'un minimum de 260 dobsons sous les tropiques à un maximum de 380 dobsons dans l'Arctique. Au début du printemps, dans certaines régions de l'Arctique, les quantités d'ozone dépassent couramment 500 dobsons certains jours (*figure 2*).

Il peut sembler surprenant à prime abord que les quantités d'ozone les plus élevées du monde soient mesurées dans l'Arctique. En fait, il y a à cela au moins trois bonnes raisons. La première est l'absence totale de lumière solaire pendant plusieurs semaines pendant l'hiver arctique; sans énergie solaire, la dissociation naturelle des molécules d'ozone est considérablement ralentie. La deuxième est que le flux d'ozone vers les pôles est généralement plus élevé en hiver. Cette situation semble liée aux fluctuations saisonnières des systèmes météorologiques en surface

et aux régimes des vents en altitude qui fournissent une grande partie de l'énergie gouvernant le déplacement stratosphérique de l'air, et donc de l'ozone, vers les pôles.

La troisième raison est que la stratosphère est plus épaisse aux latitudes polaires que n'importe où ailleurs dans le monde. Pour comprendre cet état de choses, il faut

examiner la structure verticale de l'atmosphère. La stratosphère est située sur la troposphère, qui est la couche inférieure de l'atmosphère, plus turbulente, où prennent place les activités météorologiques. La troposphère a généralement jusqu'à 18 km d'épaisseur sous les tropiques, mais seulement environ 8 km près des pôles. À cause de cette différence, la tropopause, qui est la limite entre ces deux couches, présente une pente de l'équateur vers les pôles, d'abord graduelle, puis plus prononcée, un peu comme le fond d'une piscine. La stratosphère ayant son épaisseur maximale dans l'Arctique, elle peut contenir plus d'ozone dans cette région que sous les tropiques ou aux latitudes moyennes. Pour ce qui est de l'Antarctique, les valeurs de l'ozone, même avant qu'il n'y ait eu un appauvrissement, y ont toujours été plus basses que dans l'Arctique. La différence tient à ce que les vents stratosphériques de l'hémisphère Sud sont moins efficaces pour transporter l'ozone vers le pôle.

L'ozone s'accumule graduellement dans la stratosphère arctique pendant l'hiver, époque où la recharge d'ozone provenant des tropiques dépasse le taux naturel de destruction. Avec l'arrivée du printemps, un changement dans le régime des vents stratosphériques entraîne généralement une dernière augmentation des valeurs de l'ozone, les portant à 450 dobsons ou plus. Le retour du soleil, cependant, accélère le rythme de destruction de l'ozone, alors que l'apport d'ozone des tropiques baisse considérablement et reste bas pendant tout l'été. Les niveaux d'ozone diminuent donc, passant d'un maximum de début de printemps de l'ordre de 450 dobsons à environ 300 dobsons en octobre.

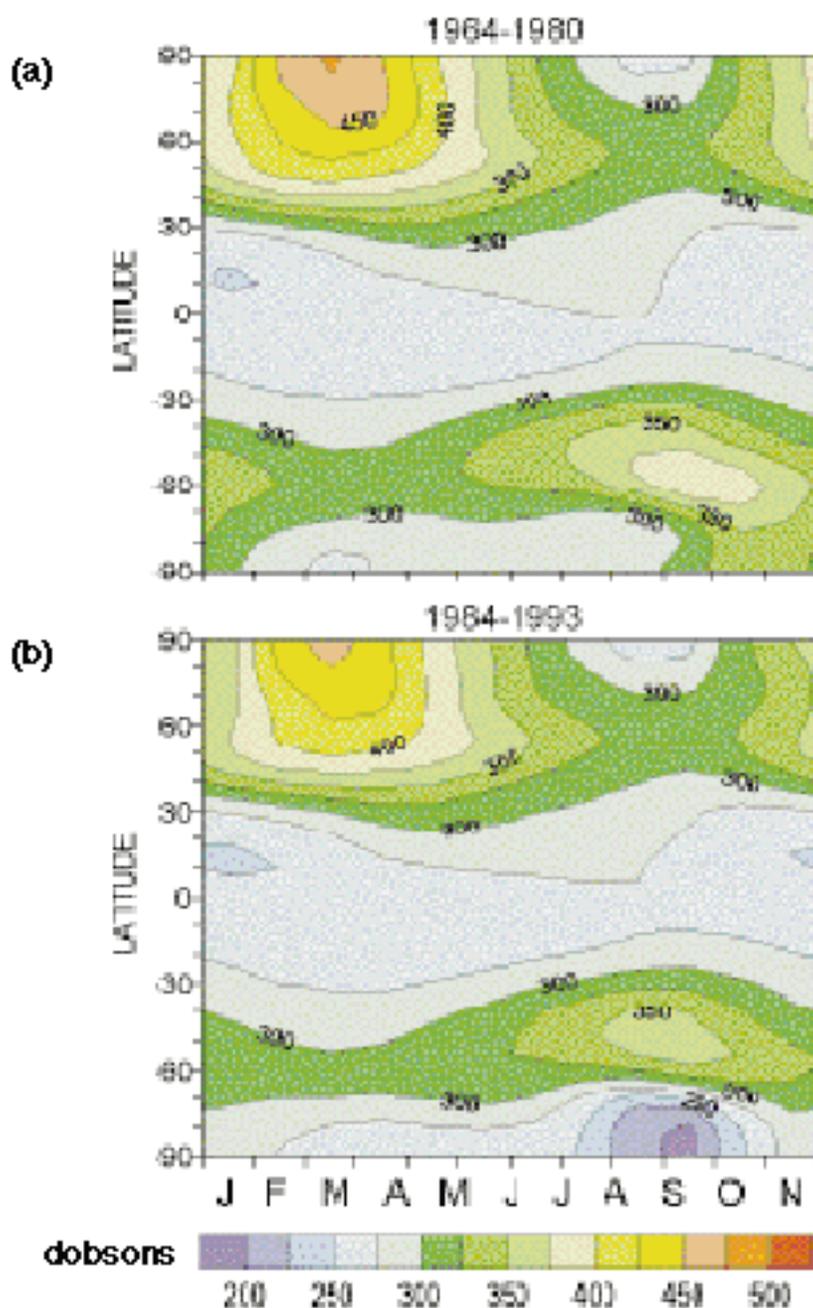


Figure 2

Abondances moyennes de l'ozone en fonction de la latitude et de la saison pour a) 1964-1988 et b) 1984-1993. Les deux graphes montrent que les valeurs maximales dans l'Arctique sont enregistrées au début du printemps. Les effets de l'appauvrissement de l'ozone sont visibles, cependant, dans le graphique b), où les valeurs printanières sont plus basses tant dans l'Arctique que dans l'Antarctique.

LES SUBSTANCES DESTRUCTRICES DE L'OZONE ET LEUR IMPACT SUR LA COUCHE D'OZONE DE L'ARCTIQUE

L'appauvrissement de la couche d'ozone est dû au fait que les activités humaines ont injecté dans la stratosphère des quantités excessives de chlore, de brome et d'autres substances destructrices de l'ozone. Pour le chlore, qui est la plus abondante de ces substances dans la stratosphère, les quantités excédentaires proviennent surtout des divers types de chlorofluorocarbures (CFC). Les CFC, des produits chimiques qui se prêtent à de multiples emplois, ont été largement utilisés comme réfrigérants et propulseurs d'aérosols, et dans toute une gamme d'applications industrielles. Les CFC et d'autres substances destructrices de l'ozone (comme les halons, le tétrachlorure de carbone, le méthylchloroforme et le bromure de méthyle) sont des composés stables qui, pour la plupart, peuvent séjourner dans l'atmosphère pendant de nombreuses années avant d'atteindre la stratosphère. Une fois

arrivés dans la stratosphère, cependant, ces composés s'élèvent graduellement jusqu'au-dessus de la couche d'ozone, où ils sont dissociés par l'intense rayonnement ultraviolet de la haute stratosphère, ce qui libère des atomes de chlore et de brome. C'est ainsi que la concentration de chlore dans la stratosphère est maintenant quatre fois supérieure au niveau naturel.

Le chlore et le brome sont de puissants destructeurs de l'ozone parce qu'ils ont une action catalytique. Autrement dit, ils interviennent dans des réactions qui détruisent l'ozone, mais ne sont pas eux-mêmes consommés dans le processus et peuvent donc recommencer à intervenir dans ces réactions. Par conséquent, une seule molécule de chlore ou de brome peut détruire des milliers de molécules d'ozone avant de redescendre dans la troposphère et d'être capturée par d'autres réactions chimiques.

Au-dessus des régions polaires,

deux autres facteurs contribuent à une destruction remarquablement brutale de l'ozone pendant plusieurs semaines au printemps. Le premier est le vortex polaire, circulation quasi fermée qui se développe au-dessus des pôles au début de l'hiver. Sans lumière solaire et sans apport d'air plus chaud provenant des latitudes plus basses, la stratosphère polaire devient extrêmement froide, les températures y tombant à -80°C ou moins. À ces températures, un second facteur intervient : l'apparition de nuages stratosphériques polaires (PSC, pour « polar stratospheric clouds »), formés de glace, d'acide nitrique et d'acide sulfurique. En l'absence de PSC, la plus grande partie du chlore et du brome est emprisonnée dans des composés qui, dans des conditions normales, seraient très stables et donc sans danger pour la couche d'ozone. Les PSC entraînent cependant la dissociation de ces composés, laissant les atomes de chlore et de brome

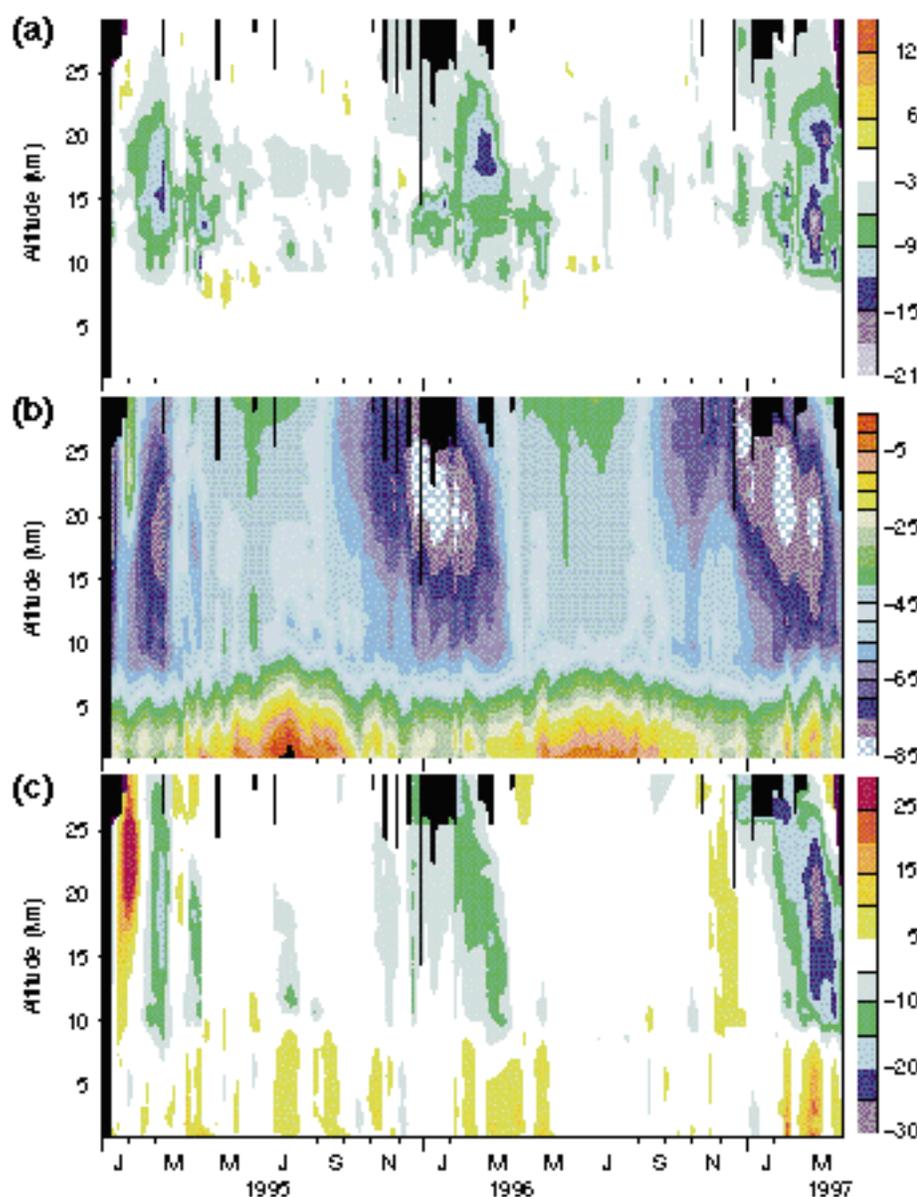


Figure 3

a) écarts des valeurs de l'ozone par rapport à la normale, en dobsons/km; b) température en °C; et c) écarts, en °C, de la température par rapport à la normale à Alert, station de recherches de l'Arctique, de janvier 1995 à avril 1997. Les graphiques montrent une étroite corrélation entre un fort appauvrissement de l'ozone (zones en bleu clair, bleu foncé et mauve du panneau a) et des températures de la stratosphère inférieures à $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ (zones en mauve et gris du panneau b).

dans des composés moins stables. Lorsque le soleil revient, au printemps, ces composés sont dissociés par le rayonnement solaire; du chlore et du brome sont donc libérés. En temps normal, les réactions qui détruisent l'ozone exigent un rayonnement solaire relativement fort. Cependant, avec les basses températures et les concentrations de chlore particulièrement élevées rencontrées à proximité des PSC, il se produit d'autres réactions, complètement différentes, qui sont de loin beaucoup plus efficaces pour détruire l'ozone. L'apport de nouvel ozone en provenance des latitudes inférieures étant bloqué par le vortex, les quantités d'ozone chutent rapidement et considérablement à mesure que ces réactions prennent place (figure 3). Dans certaines couches de la stratosphère, l'ozone peut être presque complètement détruit.

Dans l'Antarctique, ces processus se traduisent régulièrement par l'apparition d'un énorme trou d'ozone (c'est ainsi que l'on désigne une région où les quantités d'ozone totale sont inférieures à 220 dobsons). Ces trous ne se comblent pas tant que le vortex hivernal ne s'est pas dissipé, ce qui permet le retour d'air des tropiques riche en ozone, et que les températures plus élevées empêchent la formation de PSC. Dans l'Arctique, les mêmes processus intensifient l'appauvrissement mais, jusqu'ici du moins, leur effet n'est pas aussi grave qu'en Antarctique. À quoi tient alors cette différence? La raison est en grande partie que, la circulation atmosphérique ayant une plus grande variabilité dans l'hémisphère Nord, le vortex de l'Arctique est moins stable que celui de l'hémisphère Sud. Il est donc souvent pénétré par des vents stratosphériques apportant de l'ozone

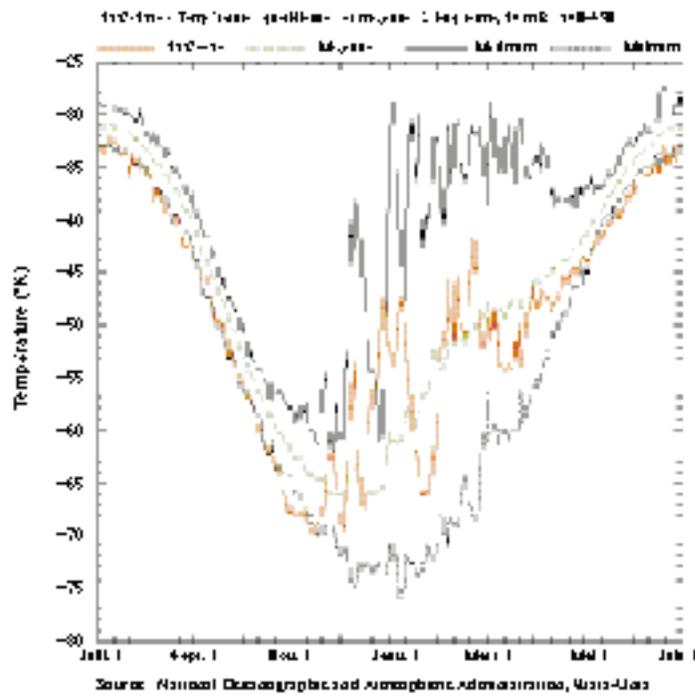


Figure 4

Températures quotidiennes de la stratosphère de l'Arctique entre le 65° degré de latitude Nord et le pôle Nord, du 1er juillet 1997 au 30 juin 1998, et moyennes à long terme. Les fréquents réchauffements de la stratosphère arctique, qui sont très visibles pour l'hiver 1997-1998, empêchant l'apparition de nuages stratosphériques polaires et des processus chimiques qui entraînent un grave appauvrissement de l'ozone.

et de l'air plus chaud du sud. Ces épisodes, appelés réchauffements stratosphériques, rendent souvent la stratosphère de l'Arctique trop chaude pour que des PSC puissent se former (figure 4). Les PSC sont donc moins fréquents et persistent moins longtemps dans l'Arctique qu'au pôle Sud. C'est pourquoi il n'y a pas eu d'énorme trou d'ozone au-dessus de l'Arctique. Cependant, la formation de PSC peut accélérer considérablement la destruction de l'ozone.



AUTRES FACTEURS INFLUANT SUR L'APPAUVRISSMENT DE L'OZONE DANS L'ARCTIQUE

Bien que ce soient les substances destructrices de l'ozone et les processus uniques d'appauvrissement en jeu dans la stratosphère polaire qui ont l'impact le plus spectaculaire sur l'ozone dans l'Arctique, plusieurs autres facteurs interviennent aussi. Par exemple, les variations quotidiennes sont souvent liées au déplacement des systèmes météorologiques et des champs de pression dans la troposphère, et aux changements de hauteur de la tropopause. Les fluctuations à long terme ont été associées à divers autres processus naturels, dont les plus importants sont la renverse périodique des vents stratosphériques au-dessus de l'équateur (oscillation quasi biennale), les épisodes El Niño, le cycle des taches solaires et les éruptions volcaniques (figure 5).

L'OSCILLATION QUASI BIENNALE

Au-dessus de l'équateur, les vents stratosphériques font le tour du globe soit en direction est, soit en direction ouest. Tous les 20 à 30 mois, la direction s'inverse. Ce phénomène est connu sous le nom d'oscillation quasi biennale (QBO). On n'en comprend pas tellement la cause, mais on sait qu'il influe sur divers paramètres de l'atmosphère, dont les quantités

d'ozone aux latitudes moyennes et élevées. Quand la QBO est dans la phase de l'ouest, les températures de la stratosphère polaire sont généralement plus basses, le transport d'ozone vers le pôle est réduit, et l'appauvrissement tend à être plus grand. En 1993, 1995 et 1997, par exemple, la QBO était dans la phase de l'ouest et on a enregistré d'importantes pertes d'ozone dans

l'Arctique. En 1994, 1996 et 1998, elle était dans la phase de l'est. L'appauvrissement a été minimum, comme prévu, en 1994 et 1998 mais, en 1996, on a constaté des pertes atteignant jusqu'à 30 %. Ces résultats inattendus suggèrent que des facteurs autres que la QBO ont eu un effet plus marqué sur les niveaux d'ozone cette année-là.

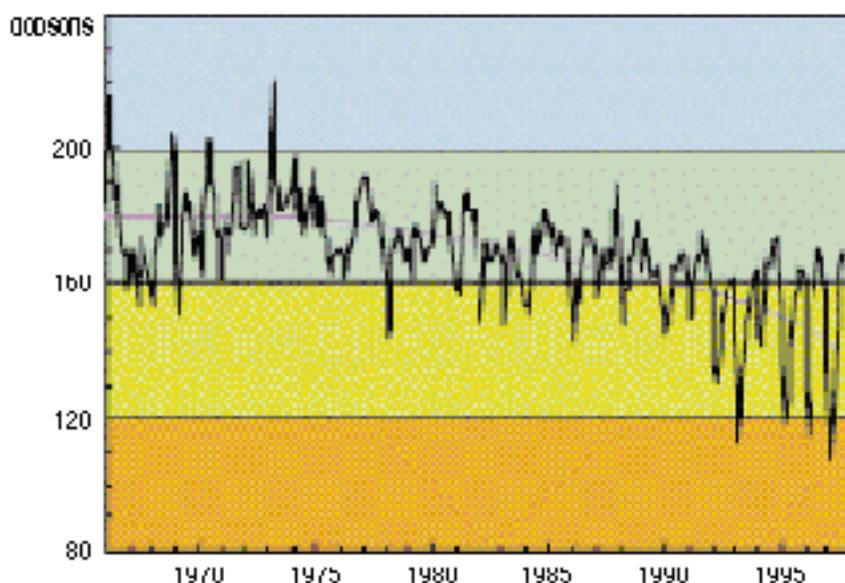


Figure 5

Quantités d'ozone dans la basse stratosphère (18-28 km d'altitude) sur l'Arctique canadien. Le graphique montre une tendance à la baisse débutant à la fin des années 70. La forte variabilité d'une année à l'autre reflète l'influence de facteurs tels que l'oscillation quasi biennale, les épisodes El Niño, le cycle solaire et les éruptions volcaniques.

EL NIÑO-OSCILLATION AUSTRALE

Les épisodes El Niño sont des réchauffements anormaux périodiques de l'est du Pacifique équatorial. Survenant environ tous les trois à sept ans, ils sont accompagnés d'un renversement des régimes de pression normaux sur l'hémisphère Sud (phénomène appelé Oscillation australe) et entraînent des perturbations des régimes météorologiques dominants dans une grande partie de la planète. Comme les El Niño influent aussi sur les régimes de pression normaux dans la haute troposphère, ils peuvent modifier la hauteur de la tropopause, le transport de l'ozone vers les pôles et les quantités d'ozone en bien des régions du monde.

Une des conséquences du fort épisode El Niño de 1997-1998 a été le creusement de la dépression des Aléoutiennes, vaste zone de basse pression semi-permanente sur le nord-est de l'océan Pacifique. C'est un important élément de la circulation atmosphérique à grande échelle, et son renforcement a très bien pu rendre le vortex arctique

moins stable et plus sensible aux réchauffements stratosphériques qui y ont adouci les températures pendant l'hiver 1998. En rendant les conditions moins propices à la formation de PSC, le phénomène El Niño peut avoir été un facteur significatif de l'appauvrissement relativement bas de l'ozone dans l'Arctique que l'on a observé au printemps de 1998.

LE CYCLE SOLAIRE

Avec une périodicité d'environ 11 ans, la production d'énergie du Soleil varie d'environ 0,1%, avec la croissance et la décroissance des taches présentes sur la surface du Soleil. Lorsque le nombre de taches solaires est maximal, le Soleil produit plus d'énergie que lorsque ce nombre est à son minimum. Bien que ce changement soit très faible, il est concentré en majorité dans le spectre ultraviolet. Comme l'ozone se forme par dissociation des molécules

d'oxygène sous l'effet du rayonnement ultraviolet du Soleil, il s'en produit donc plus les années où le cycle des taches solaires est à un maximum. Les variations observées des quantités d'ozone sur le cycle sont d'environ 1 à 2%.

Des études récentes ont montré un lien entre, d'une part, le maximum du cycle solaire et, d'autre part, un léger réchauffement de la stratosphère pendant l'hiver (ce qui la rend donc un peu moins propice à la formation de PSC) et un renforcement du transport d'ozone vers les pôles (figure 6). Ces conditions tendent toutes deux à faire baisser l'appauvrissement de l'ozone dans l'Arctique. Toutes choses étant égales par ailleurs, l'appauvrissement de l'ozone dans l'Arctique sera donc probablement moindre les années de maximum du cycle solaire (comme ce fut le cas en 1968, 1979, 1990, et le sera de nouveau en 2000).



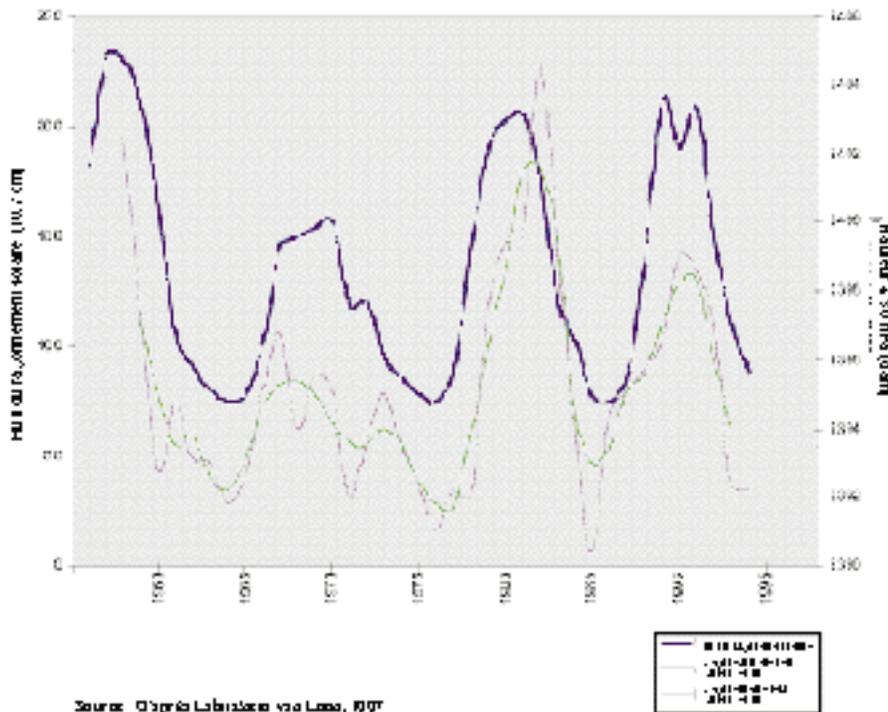


Figure 6

Cycle solaire et régimes annuels moyens de la pression atmosphérique, 38°N, 158°W. Les deux courbes pâles montrent les variations de la hauteur moyenne annuelle à laquelle on observe une pression de 38 hPa. Elles suivent de très près les variations du rayonnement solaire (courbe sombre) qui surviennent au cours du cycle de onze ans des taches solaires. Ces variations de pression influent sur le transport de l'ozone vers les pôles, et la quantité d'ozone entraînée vers l'Arctique est plus élevée quand le rayonnement solaire incident est maximal.

VOLCANS

Les grandes éruptions volcaniques peuvent avoir une incidence significative sur l'appauvrissement de l'ozone pendant une période d'un ou deux ans. En effet, des réactions chimiques semblables à celles qui prennent place dans les PSC peuvent se produire sur la surface des aérosols (fines gouttelettes ou particules) de sulfates qui se sont formés dans la stratosphère en raison des éruptions. Ces aérosols peuvent aussi favoriser la formation de PSC via divers processus indirects.

En 1991, par exemple, l'éruption du mont Pinatubo, aux Philippines, a injecté dans la stratosphère environ 120 millions de tonnes de dioxyde de soufre, en une ou deux semaines, ce gaz avait été transformé en aérosols de sulfates par des réactions chimiques dans l'atmosphère. Au cours des deux années suivantes, on a observé un grave appauvrissement de l'ozone tant aux latitudes moyennes qu'aux pôles. Au-dessus du Canada, au printemps de 1993, les quantités d'ozone étaient de 10 à 17 % inférieures à la normale, soit la baisse la plus importante jamais enregistrée. En même temps, dans le haut-Arctique, les quantités d'ozone de la basse stratosphère (entre 10 et 20 km d'altitude) tombaient à environ 110 Dobson, un minimum qu'on n'a revu qu'en 1997.

Étant donné qu'il est impossible de prédire quand surviendront les éruptions et quelle sera leur intensité, les volcans constituent la grande inconnue des estimations de l'appauvrissement futur de l'ozone.



LES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

On considère généralement que l'appauvrissement de l'ozone et le changement climatique sont deux problèmes distincts. En effet, ils font intervenir des processus atmosphériques différents, ils ont des impacts différents et ils font l'objet de négociations et traités internationaux différents. Cependant, les deux affectent la même atmosphère et, vu le jeu complexe des interactions et rétroactions qui

caractérisent le comportement de celle-ci, il n'est pas surprenant qu'il y ait d'importants liens entre eux.

Ces dernières années, le changement climatique est devenu une très sérieuse préoccupation, parce que les activités humaines ont fait monter les concentrations de gaz à effet de serre, comme le dioxyde de carbone, le méthane et l'oxyde nitreux, bien au-dessus des seuils naturels. Ces gaz influent sur le

climat de la planète en retenant la chaleur dans la troposphère, ce qui élève la température moyenne du globe et entraîne des changements des régimes mondiaux de circulation et de précipitations (figure 7). Le dioxyde de carbone, issu de la combustion de combustibles fossiles, est le plus abondant des gaz à effet de serre libérés par les activités humaines, mais les CFC, les principaux agents de

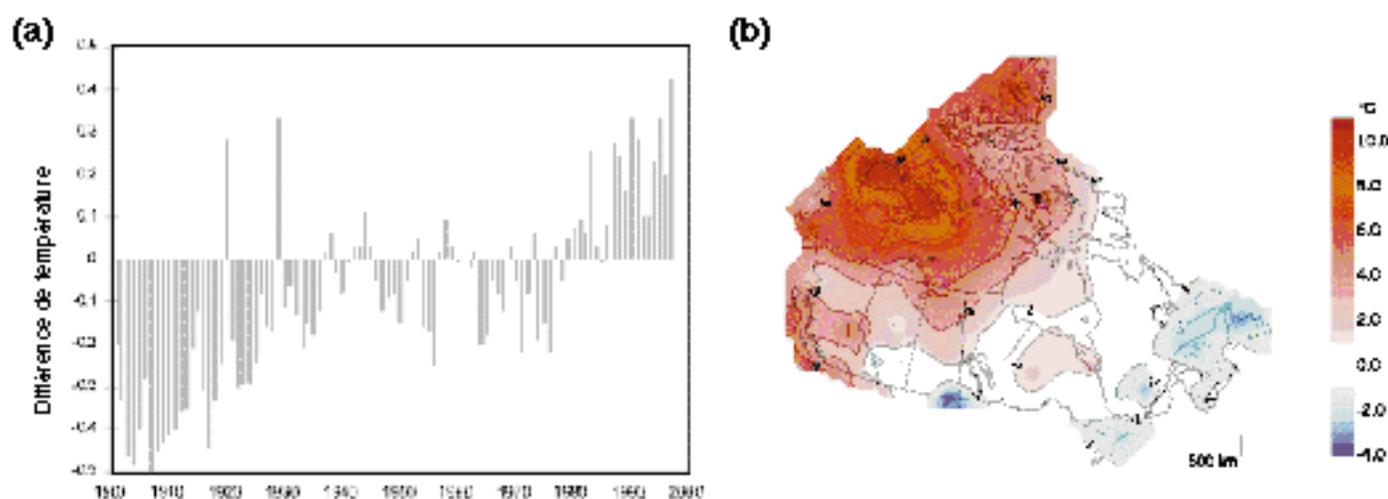


Figure 7

a) Différences entre les températures planétaires moyennes en surface et la moyenne de 1961-1998, et b) cumul des variations de température au Canada entre 1993 et 1997, par rapport à la moyenne de 1951-1988. Au cours du dernier siècle, la Terre dans son ensemble s'est réchauffée d'environ 0,3 à 0,6 °C. Au Canada, la plus grande partie de l'Arctique a connu des conditions exceptionnellement douces au milieu des années 90. Les expériences effectuées avec des modèles du climat suggèrent que la température moyenne de la planète pourrait monter d'encore 1,8 à 3,5 °C au cours du prochain siècle avec la poursuite de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre. Ces modèles prévoient aussi un refroidissement de la stratosphère associé à l'élévation des températures en surface. Selon les observations actuelles, les températures de la basse stratosphère montrent une tendance à la baisse d'environ 0,6 °C par décennie entre 1979 et 1994. Un refroidissement de la stratosphère pourrait se traduire par une formation plus fréquente de nuages stratosphériques polaires et par une aggravation de la perte d'ozone sur l'Arctique.



L'appauvrissement de l'ozone, sont aussi de puissants gaz à effet de serre. En outre, l'ozone lui-même a un effet considérable sur le bilan thermique de la Terre. Non seulement il ajoute de la chaleur à la stratosphère en absorbant le rayonnement ultraviolet du Soleil, mais aussi il se comporte comme un gaz à effet de serre. Les pertes d'ozone entraînent un refroidissement de la stratosphère et de la troposphère, ce qui compense en partie, mais pas en totalité, le réchauffement direct dû aux CFC. Près de la surface de la Terre, cependant, les quantités d'ozone ont substantiellement augmenté au cours

du XX^e siècle en raison de la pollution atmosphérique. Cette hausse a grandement contribué au réchauffement planétaire, quoique moins que les accroissements de la quantité de dioxyde de carbone.

L'état de l'atmosphère en un instant donné est le résultat d'un rééquilibrage constant d'un grand nombre de processus. Si certains d'entre eux sont perturbés, les substances destructrices de l'ozone et les gaz à effet de serre déclenchent une série de rajustements qui affectent d'autres éléments de l'équilibre. Et il est presque sûr que certains de ces rajustements ont un grand impact sur l'appauvrissement de l'ozone.

Il est possible, par exemple, que l'augmentation des concentrations de

méthane fasse monter la teneur en vapeur d'eau de la stratosphère, puisqu'il s'en forme lorsque le méthane réagit avec le radical hydroxyle, un composé d'hydrogène et d'oxygène de courte durée de vie, mais hautement réactif. S'il y a davantage de vapeur d'eau dans la stratosphère, il pourrait se former davantage de PSC (dans les bonnes conditions de température) et l'appauvrissement de l'ozone s'accentuerait. L'absorption du radical hydroxyle dans cette réaction (qui se produit aussi dans la troposphère) aurait elle aussi des effets importants, puisque ce radical est un des plus grands capteurs atmosphériques de polluants et un élément clé d'un grand nombre de réactions chimiques intervenant dans l'atmosphère. Une réduction de l'abondance atmosphérique du radical hydroxyle aurait un impact considérable sur les concentrations de nombreux autres gaz.

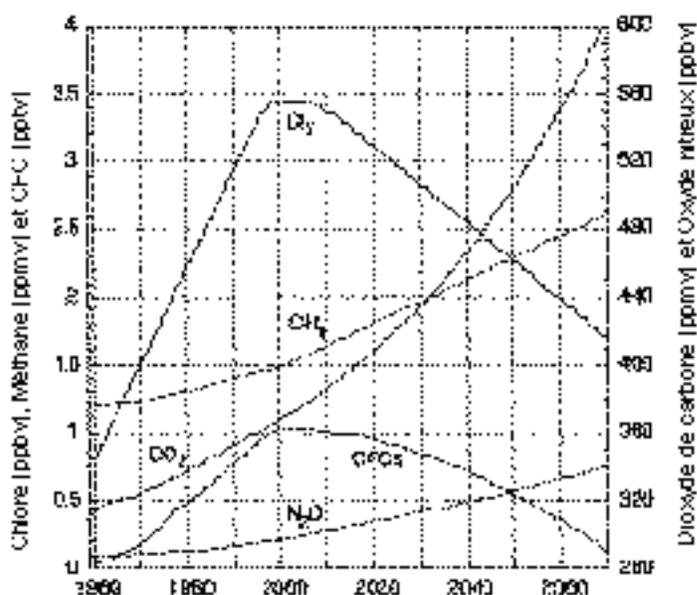


Une crainte plus sérieuse est le refroidissement prévu de la stratosphère découlant de l'accumulation de gaz à effet de serre. Les changements du rayonnement infrarouge de l'atmosphère qui entraînent un réchauffement dans la basse atmosphère ont en effet tendance à faire refroidir la stratosphère. Ce refroidissement (qui vient s'ajouter à celui déjà causé par la perte d'ozone) accroîtrait grandement la probabilité de formation de PSC au-dessus de l'Arctique, où la température de la stratosphère se situe souvent à quelques degrés seulement du seuil requis. Avec une formation plus fréquente de PSC au-dessus de l'Arctique, le taux de destruction de l'ozone monterait considérablement.

On peut étudier les interactions entre le réchauffement par effet de serre et l'appauvrissement de l'ozone à l'aide de modèles informatiques du système climatique planétaire qui intègrent non seulement les effets de réchauffement des gaz à effet de serre, mais aussi les réactions qui régissent la composition chimique de l'atmosphère. Ces modèles ne donnent cependant pas de valeurs raisonnablement précises pour les températures actuelles dans la stratosphère d'hiver à moins d'être ajustés à l'aide de contraintes

particulières. Comme ces contraintes priment sur certains aspects de la physique connue de l'atmosphère, elles ne peuvent corriger que les valeurs de départ, mais n'empêchent pas l'apparition d'erreurs supplémentaires lors de l'exécution du modèle. Donc, même si un modèle peut prévoir un changement plausible des températures de la stratosphère, il est très difficile de connaître le degré d'erreur qui entache cette prévision.

Bien que conscients de ces problèmes, des scientifiques du Goddard Institute for Space Studies et du Center for Climate Systems, de la NASA des États-Unis, ont récemment fait connaître les résultats d'une simulation des effets combinés des hausses des concentrations de gaz à effet de serre et des baisses des substances destructrices de l'ozone qui devraient survenir au cours des prochaines décennies (figure 8). Les sorties du modèle ont indiqué que les régimes planétaires des températures et des vents changeaient à mesure que les concentrations de gaz à effet de serre augmentaient, et que l'on constatait une baisse de fréquence des réchauffements stratosphériques dans l'hémisphère Nord. Avec un vortex plus stable sur l'Arctique et des températures plus basses dans la stratosphère inférieure, la gravité et la durée des épisodes d'appauvrissement de l'ozone augmentaient, atteignant un plafond



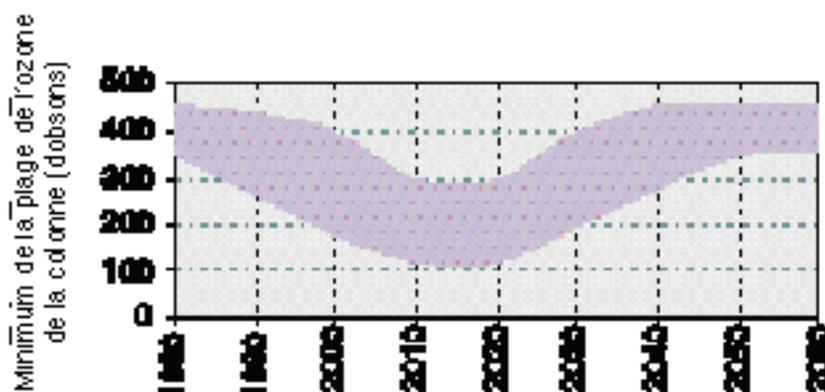
Source: Staudin et al., 1998

Figure 8

Hypothèses d'émissions utilisées dans le modèle du Goddard Institute (GIS). La combinaison d'une hausse des concentrations de gaz à effet de serre et du maintien de concentrations élevées de substances destructrices de l'ozone dans les prochaines décennies pourrait intensifier l'appauvrissement de l'ozone dans l'Arctique.

entre 2010 et 2020, soit 10 à 20 ans plus tard qu'on pourrait s'y attendre si l'on ne prenait en compte que les concentrations des substances destructrices d'ozone (figure 9). Dans ce cadre général, cependant, le modèle montrait des variations considérables d'une année à l'autre, ce qui concorde avec le comportement actuel de la stratosphère arctique.

Cette simulation justifie donc encore plus de craindre que le changement climatique causé par les gaz à effet de serre n'aggrave l'appauvrissement de l'ozone sur l'Arctique au cours des prochaines décennies. Cependant, avant d'accorder plus de certitude à ces conclusions, il faudra examiner les résultats de ce modèle et les comparer aux projections d'autres modèles utilisant des représentations plus approfondies des processus physiques et chimiques en jeu.



Source : D'après Stradal et al., 1993

Figure 9

Simulation de la plage des plus bas niveaux d'ozone au printemps, issue du modèle du DISA, pour 1988-2068. L'inclusion des gaz à effet de serre fait survenir l'appauvrissement maximal de l'ozone 10 à 20 ans plus tard qu'on ne s'y attendrait en ne prenant en compte que les concentrations de substances destructrices de l'ozone.

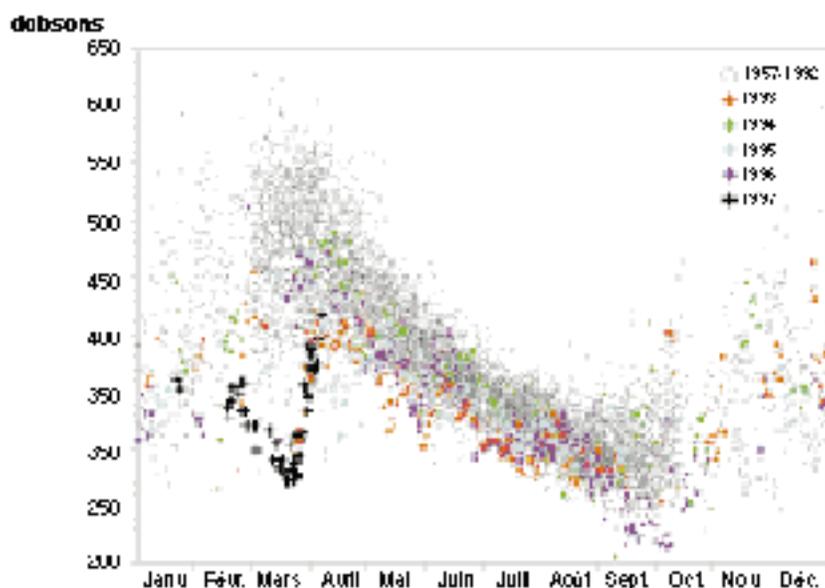


Figure 11

Ozone total au-dessus de Resolute Bay, 1957-1997. Le graphique illustre à la fois le cycle annuel des valeurs de l'ozone dans l'Arctique et la tendance générale à la baisse des valeurs de l'ozone dans les années 90. Le grave appauvrissement du printemps de 1997 est particulièrement évident.

aussi très manifeste, les valeurs printanières inférieures à 300 dobsons étant plus fréquentes après 1993. Avant 1993, on enregistrerait parfois des valeurs de printemps de moins de 300 dobsons à Resolute Bay, mais ces cas étaient relativement peu fréquents et ne duraient que quelques jours.

En mars 1996, la baisse sous la normale des valeurs de l'ozone sur le haut-Arctique a atteint jusqu'à 30 % et, en mars 1997, 45 %. Pendant l'épisode de 1997, les valeurs sont restées en dessous de 300 dobsons pendant une grande partie du mois de mars et en dessous des minimums normaux jusqu'au milieu d'avril (figure 12). Même si cet appauvrissement était considérable pour l'Arctique, les quantités d'ozone étaient encore bien supérieures à celles de l'Antarctique, où l'on a régulièrement enregistré des valeurs de 100 dobsons ou moins pendant les épisodes de trou d'ozone.

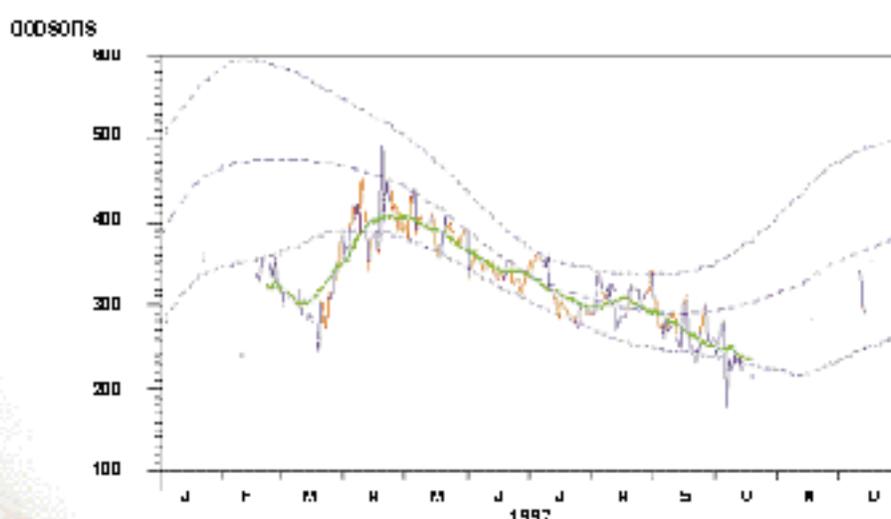


Figure 12

Ozone total au-dessus de Resolute Bay, février à octobre 1997. La ligne tirée du centre montre les valeurs moyennes de l'ozone, et les lignes du haut et du bas les valeurs maximales et minimales moyennes. Après l'appauvrissement marqué du printemps, la couche d'ozone s'est rétablie, mais les valeurs sont restées inférieures à la moyenne à long terme pendant une grande partie de l'été.



Figure 13

Observatoire de l'ozone stratosphérique d'Eureka, sur l'île d'Ellesmere, dans l'Arctique canadien.

RECHERCHES SUR L'OZONE DANS L'ARCTIQUE

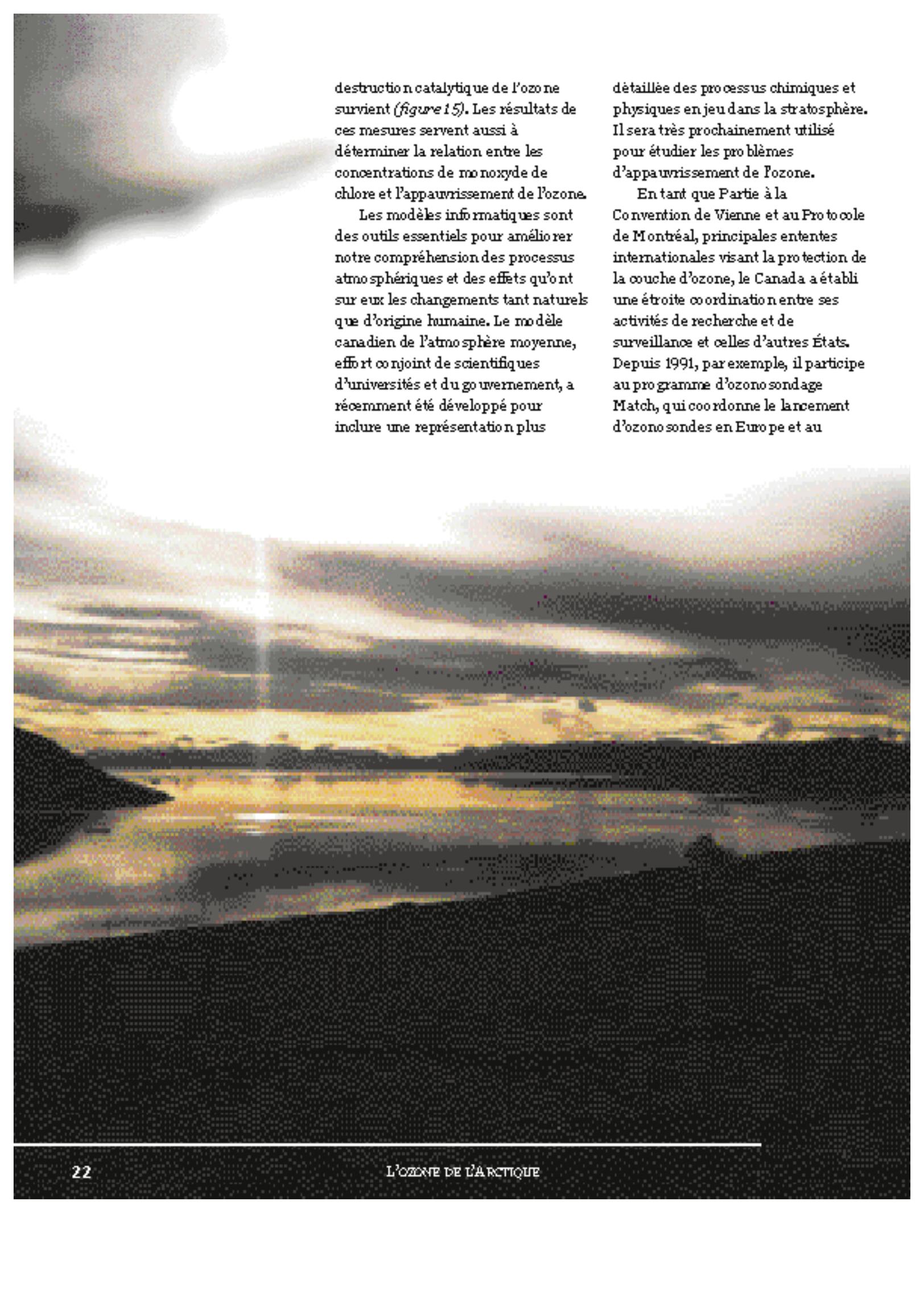
Les recherches sur l'ozone de l'Arctique ont été revitalisées en 1992 avec la réouverture de l'Observatoire de l'ozone stratosphérique d'Eureka, sur l'île d'Ellesmere (figure 13). Cet observatoire est un volet essentiel du Réseau de détection du changement stratosphérique (RDSC), groupe international de stations de recherche au sol de grande qualité visant l'étude des processus physiques et chimiques de l'atmosphère. L'observatoire d'Eureka est utilisé par des chercheurs universitaires et gouvernementaux du Canada, du Japon et des États-Unis.

Les quantités d'ozone total au-dessus d'Eureka sont mesurées toute l'année à l'aide d'un spectrophotomètre Brewer, qui

utilise l'absorption de l'ultraviolet dans la lumière du Soleil et dans celle de la Lune pour déterminer l'abondance d'ozone dans l'atmosphère. En outre, les ozonosondes lâchées chaque semaine fournissent des profils verticaux de l'ozone et de la température. Du début de décembre jusqu'à mars, on utilise un lidar pour obtenir ces profils verticaux. Le lidar, qui mesure la réflexion d'impulsions laser, comme un radar mesure celle d'ondes radio, peut aussi servir à déterminer les concentrations atmosphériques des fines particules de sulfates associées aux éruptions volcaniques, aux nuages stratosphériques polaires et à la brume arctique (sorte de smog qui est transporté en hiver des régions industrielles au sud jusque dans l'Arctique). Comme le lidar a un meilleur rendement dans l'obscurité

totale, on le ferme lorsqu'on approche l'été arctique et que les nuits raccourcissent. La superposition de mesures obtenue grâce à ces divers équipements fournit non seulement une vérification précise des quantités d'ozone total, mais peut également servir pour détecter les températures atmosphériques et les régimes de dispersion de la lumière qui indiquent la présence de nuages stratosphériques polaires (figure 14).

Un autre appareil, le spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), peut être utilisé pour mesurer la composition chimique de la stratosphère. Une des substances chimiques les plus importantes qu'il suit est le monoxyde de chlore, puisqu'une élévation des concentrations stratosphériques de ce gaz est un indicateur clé de l'occurrence d'une

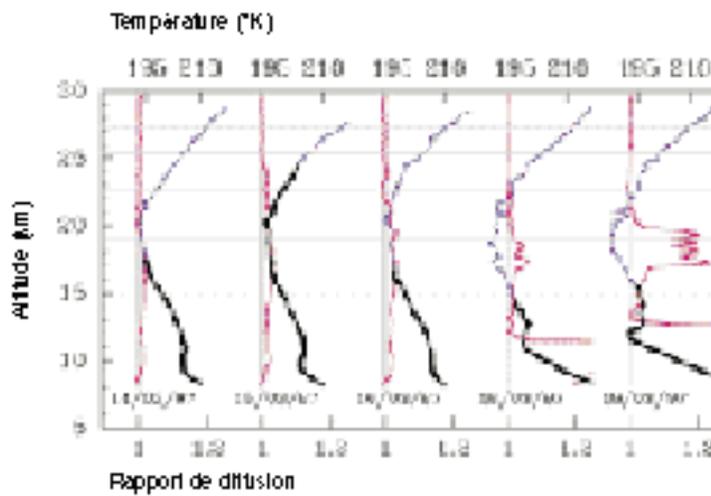


destruction catalytique de l'ozone survient (*figure 15*). Les résultats de ces mesures servent aussi à déterminer la relation entre les concentrations de monoxyde de chlore et l'appauvrissement de l'ozone.

Les modèles informatiques sont des outils essentiels pour améliorer notre compréhension des processus atmosphériques et des effets qu'ont sur eux les changements tant naturels que d'origine humaine. Le modèle canadien de l'atmosphère moyenne, effort conjoint de scientifiques d'universités et du gouvernement, a récemment été développé pour inclure une représentation plus

détaillée des processus chimiques et physiques en jeu dans la stratosphère. Il sera très prochainement utilisé pour étudier les problèmes d'appauvrissement de l'ozone.

En tant que Partie à la Convention de Vienne et au Protocole de Montréal, principales ententes internationales visant la protection de la couche d'ozone, le Canada a établi une étroite coordination entre ses activités de recherche et de surveillance et celles d'autres États. Depuis 1991, par exemple, il participe au programme d'ozonosondage Match, qui coordonne le lancement d'ozonosondes en Europe et au



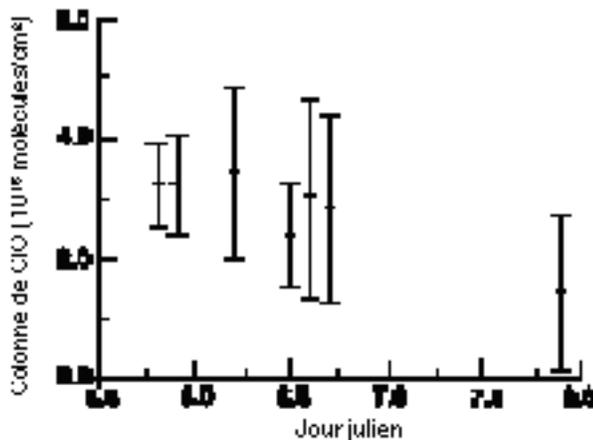
Source: O'Griss, Osherson et al., 1997

Figure 14

Température et dispersion de la lumière dans la stratosphère arctique, du 14 au 19 mars 1997. Le profil vertical de la température est porté en noir (mesures lidar) et en bleu (mesures d'ozonsonde). Les droites verticales indiquent une température de 193 K (-80 °C), seuil de formation des PSC. La ligne rouge indique la quantité de dispersion de la lumière et montre la présence de PSC le 18 et le 19.

Canada, pour analyser la même masse d'air en différents points de son déplacement autour du vortex polaire. En analysant les écarts entre les mesures prises dans cette masse d'air à différents endroits et différents moments, on peut déterminer la quantité d'ozone perdue en raison des seuls processus chimiques et éviter les distorsions causées par l'ozone provenant d'autres masses d'air. Entre autres, les données du programme Match révèlent clairement le rôle crucial de la lumière solaire dans la destruction de l'ozone (figure 16).

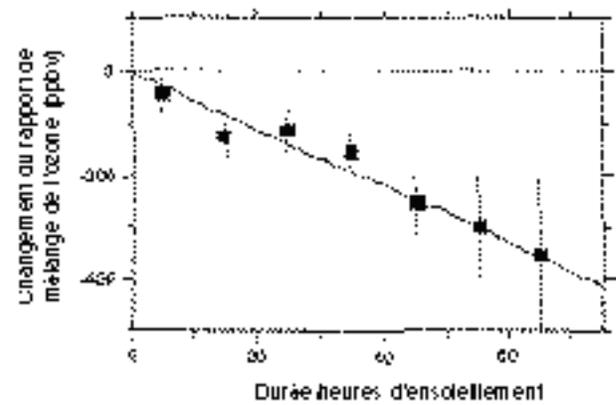
Le Canada collabore étroitement aussi avec la National Aeronautics and Space Administration (NASA), des États-Unis, au projet Polaris, qui étudie la chimie de l'ozone dans l'Arctique. Par exemple, Tom McElroy, d'Environnement Canada, a travaillé avec une équipe utilisant un avion ER-2 volant à haute altitude pour mesurer la composition chimique de la haute troposphère et de la basse stratosphère. Après analyse des données recueillies au



Source: O'Griss, Osherson et al., 1997

Figure 15

Moyennes quotidiennes des quantités de monoxyde de chlore au-dessus d'Eureka après le lever polaire du Soleil, en 1997. Les valeurs élevées entre les jours 55 et 78 révèlent un appauvrissement de l'ozone.



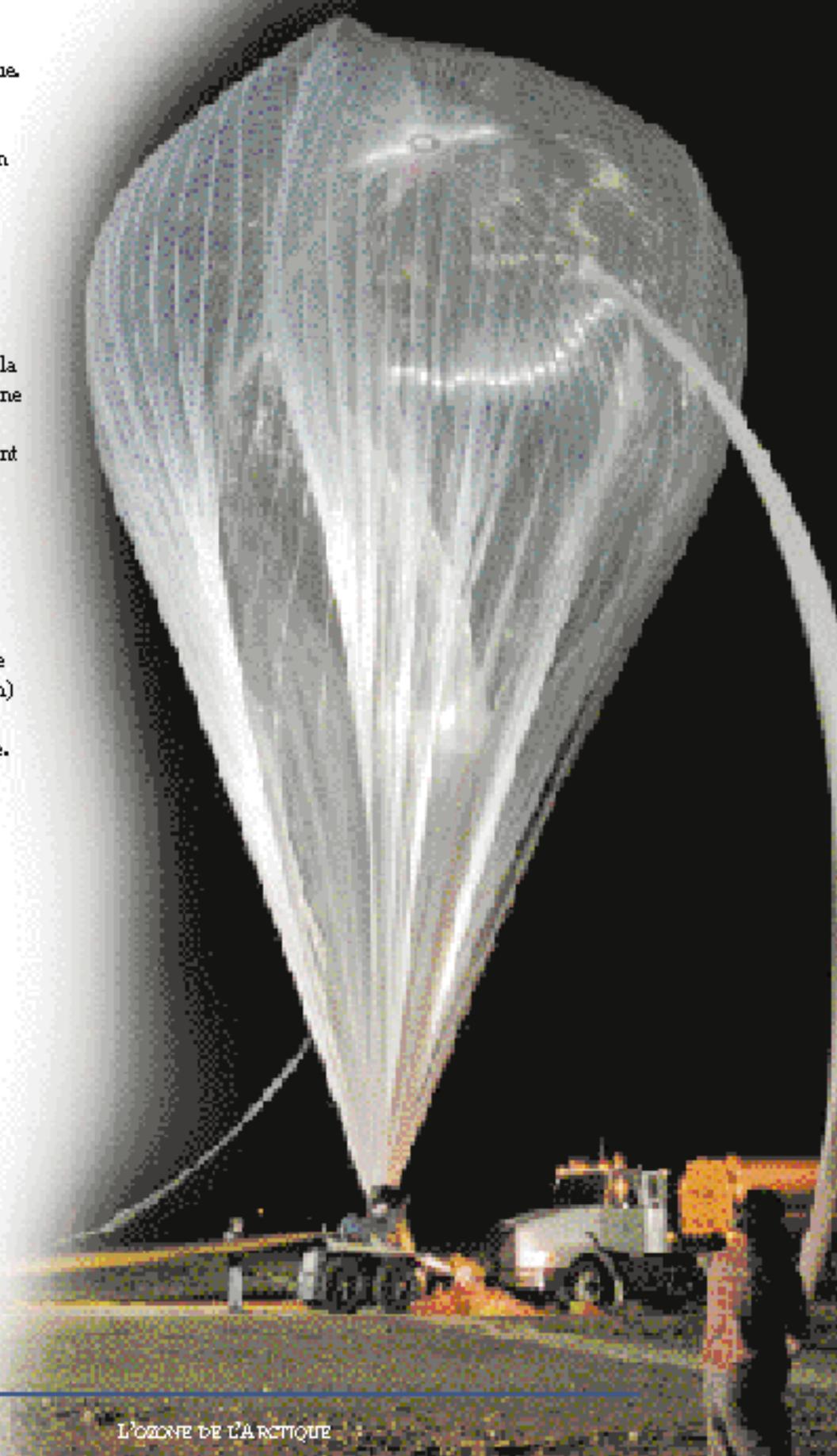
Source: O'Griss, Rex et al., 1992

Figure 16

Changements des concentrations d'ozone avec l'exposition à la lumière solaire, du 4 janvier au 9 février 1992. Les mesures faites dans une même masse d'air à mesure qu'elle circule au tour du vortex arctique montrent une baisse régulière des concentrations d'ozone à mesure qu'augmente l'exposition cumulative à la lumière solaire.

cours de ces vols, M. McElroy a récemment découvert des indications que du monoxyde de brome, composé associé à la destruction de l'ozone, était présent dans les couches supérieures de la troposphère arctique. On ne s'attendait pas à rencontrer ce composé dans la haute troposphère. Du fait de son lien avec la destruction de l'ozone par le brome, sa présence laisse penser qu'il se produit un appauvrissement additionnel de l'ozone, du moins de temps à autre, dans la haute troposphère. Ces résultats soulignent à quel point est incomplète notre compréhension de la chimie de l'appauvrissement de l'ozone dans la troposphère.

Outre ces activités, Environnement Canada exploite le Centre mondial des données sur l'ozone et le rayonnement ultraviolet pour le compte de l'Organisation météorologique mondiale et de la communauté scientifique internationale. Le site Web du Centre (www.tor.ec.gc.ca/woudc/woudc.htm) contient les données de plus de 150 stations réparties sur toute la planète.



L'AVENIR DE LA COUCHE D'OZONE DE L'ARCTIQUE

Le Protocole de Montréal de 1987 et ses amendements ultérieurs visent à éliminer graduellement l'utilisation des substances chimiques qui appauvrissent la couche d'ozone pour des fins non essentielles et à ramener la couche d'ozone à son état initial. Grâce à ces ententes, les concentrations atmosphériques de certaines substances destructrices de l'ozone, comme le CFC-11, ont commencé à baisser et celles d'autres suivront dans les 10 années à venir (figure 17). Vu le temps que prennent les substances destructrices d'ozone pour atteindre la stratosphère et s'y dissocier, la baisse des niveaux stratosphériques de chlore et de brome accusera un retard de quelques années sur celles des concentrations de CFC et d'autres substances destructrices de l'ozone. On croit, par exemple, que la quantité de chlore dans la stratosphère, qui est actuellement de 3,5 parties par milliard (ppb), culminera aux alentours de 2003, puis baissera. En 2050, elle devrait se situer à 2,0 ppb, seuil auquel on a détecté le premier trou d'ozone de l'Antarctique. On peut donc s'attendre à constater que les valeurs de l'ozone se seront substantiellement améliorées d'ici 2050. Cet optimisme suppose bien entendu que les lacunes de notre compréhension des processus

d'appauvrissement de l'ozone se révèlent de peu de gravité et que les ententes internationales actuelles sont strictement honorées. Si l'une ou l'autre de ces hypothèses est incorrecte, l'ozone mettra plus longtemps à se restaurer.

Le rétablissement de la couche d'ozone pourrait être encore retardé si des substances destructrices d'ozone qui ne sont pas visées par les ententes actuelles commencent à être libérées dans l'atmosphère en quantités importantes. Cette

possibilité pourrait se concrétiser d'ici le milieu du XXI^e siècle avec le développement d'avions de transport supersoniques qui voleraient dans la basse stratosphère. Une flotte de 500 à 1000 de ces appareils libérerait de grandes quantités d'oxydes d'azote, de vapeur d'eau et de sulfates, substances qui ont toutes le potentiel d'accroître la destruction de l'ozone. Comme elles contribuent aussi à la formation des PSC, leur impact sur les niveaux d'ozone dans l'Arctique pourrait être particulièrement nocif.

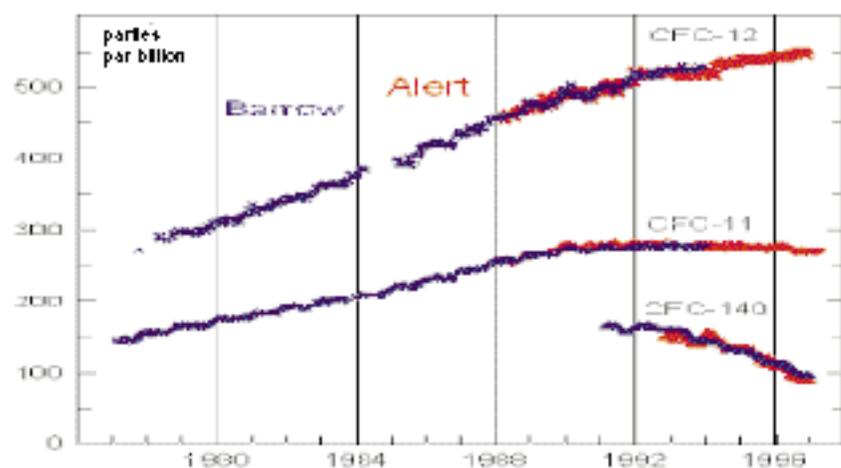


Figure 17

Concentrations des substances destructrices de l'ozone dans la troposphère arctique. Les CFC sont très stables dans la troposphère et ne se dissocient que lorsqu'ils sont exposés à l'intense rayonnement ultraviolet dans la haute stratosphère. Le chlore qu'ils contiennent finit par retourner dans la troposphère, mais le cycle prend une cinquantaine d'années pour le CFC-11 et une centaine pour le CFC-12.

Par une curieuse ironie des choses, les efforts que nous faisons actuellement pour débarrasser l'atmosphère des substances destructrices de l'ozone peuvent avoir une incidence négative sur le changement climatique, ce qui, à son tour, influerait sur l'appauvrissement futur de l'ozone de l'Arctique. Les hydrochlorofluorocarbures (HCFC) et hydrofluorocarbures (HFC), substances les plus couramment utilisées pour remplacer les CFC, sont aussi des gaz à effet de serre, et certaines d'entre elles ont un potentiel de réchauffement du globe presque aussi élevé que les CFC. Leur utilisation ajoutera donc au réchauffement par effet de serre et au refroidissement de la stratosphère qui l'accompagne. C'est pourquoi la consommation de HCFC devrait être éliminée graduellement d'ici 2030 aux termes des amendements de Copenhague au Protocole de Montréal. L'utilisation des HFC est réglementée par le Protocole de Kyoto de 1997 à la Convention-cadre sur les changements climatiques.

Pour faire face à tous ces problèmes complexes, la recherche et la surveillance demeureront des outils importants. Il faudra continuer

à mesurer les quantités d'ozone, ainsi que des CFC, du chlore, du brome, des sulfates, des nitrates et des autres éléments clés du processus d'appauvrissement de l'ozone pour pouvoir évaluer les progrès réalisés dans le rétablissement de la couche d'ozone. Des études supplémentaires des processus atmosphériques seront aussi essentielles si nous voulons réduire les lacunes de notre compréhension actuelle de l'appauvrissement de l'ozone et améliorer notre capacité de prédire le devenir probable de la couche d'ozone.

La couche d'ozone sera très vulnérable au cours des 20 prochaines années, lorsque les concentrations atmosphériques de substances destructrices d'ozone seront à leur maximum ou proche de celui-ci. L'Arctique le sera alors particulièrement si l'augmentation continue des concentrations de gaz à effet de serre entraîne un refroidissement supplémentaire de la stratosphère et une formation plus fréquente de PSC. Des facteurs naturels, comme l'oscillation quasi biennale, les épisodes El Niño et le cycle solaire, vont aussi jouer sur la gravité de l'appauvrissement de

l'ozone certaines années, et de fortes éruptions volcaniques pourraient causer des baisses très marquées.

À beaucoup plus long terme, la santé de la couche d'ozone dépend surtout de la façon dont nous arriverons à débarrasser l'atmosphère des substances destructrices d'ozone qui y sont actuellement présentes et à empêcher qu'il n'en soit libéré davantage. Elle dépendra aussi du succès de nos efforts de limitation des émissions de gaz à effet de serre. Ces problèmes sont liés, comme nous l'avons vu, par diverses interactions physiques et chimiques. Ils le sont aussi au niveau des écosystèmes, où les plantes et animaux subissent l'impact non seulement de l'appauvrissement de l'ozone ou du changement climatique séparément, mais aussi de toute une gamme de stress imposés par l'homme aux systèmes naturels. Il s'ensuit que nous ne pouvons pas traiter ces problèmes indépendamment les uns des autres. Il nous faut au contraire les considérer comme des éléments interreliés d'une stratégie globale d'atténuation de l'impact de l'homme sur l'atmosphère.



BIBLIOGRAPHIE

Austin, J., N. Butchart, and K.P. Shine, 1992. Possibility of an Arctic ozone hole in a doubled-CO₂ climate. *Nature*, **360**, 221-225.

Bojkov, R.D., and V.E. Fioletov, 1995. Estimating the global ozone characteristics during the last 30 years. *Journal of Geophysical Research*, **100**, 16,537-16,551.

Bojkov, R.D., and V.E. Fioletov, 1996. Total ozone variations in the tropical belt: an application for quality of ground-based measurements. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **58**, 223-240.

Coy, L., E. Nash, and P. Newman, 1997. Meteorology of the polar vortex Spring 1997. *Geophysical Research Letters*, **24**, 2693-2696.

Dameris, M., et al., 1998. Assessment of the future development of the ozone layer. *Geophysical Research Letters*, **25**, 3579-3582.

Danilin, M.Y., et al., 1998. Stratospheric cooling and Arctic ozone recovery. *Geophysical Research Letters*, **25**, 2141-2144.

Danovon, D.P., H. Fast, et al., 1997. Ozone, column ClO, and PSC measurements made at the NDSC Eureka observatory (80°N, 86°W) during the spring of 1997. *Geophysical Research Letters*, **24**, 2709-2712.

Fioletov, V.E., et al., 1997. Long-term ozone decline over the Canadian Arctic to early 1997 from ground-based and balloon observations. *Geophysical Research Letters*, **24**, 2705-2708.

Hugh, J. D., 1996. The impact of solar variability on climate. *Science*, **272**, 981-984.

Hasebe, F., 1994. Quasi-biennial oscillations of ozone and diabatic circulation in the equatorial stratosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **51**, 729-745.

Hengeveld, H., 1995. Comprendre l'atmosphère en évolution. *Rapport EDE No. 95-2*. Ottawa: Environnement Canada.

Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell, eds., 1996. Climate Change 1995: *The Science of Climate Change. Summary for Policymakers and Technical Summary of the Working Group I Report*. Genève: Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat.

Kerr, R.A., 1998. Deep chill triggers record ozone hole. *Science*, **282**, 391.

Lahitzke, K. and H. van Loon, 1997. The signal of the 11-year sunspot cycle in the upper to posphere—lower stratosphere. *Space Science Reviews*, **80**, 393-410.

MacKay, R.M., et al., 1997. An estimate of the climatic effects of stratospheric ozone losses during the 1980s. *Journal of Climate*, **10**, 774-788.

Mahjani, A. and K.R. Gurney, 1995. Mending the Ozone Hole. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.

Maney, G.L., et al., 1997. MLS observations of Arctic ozone loss in 1996-97. *Geophysical Research Letters*, **24**, 2697-2700.

Matsuyama, T., 1997. The quasi-biennial oscillation (QBO) and equatorial waves — a historical review. *Papers in Meteorology and Geophysics*, **48**, 1-17.

McConnell, J. and J. Kaminski, 1996. Science of Total Atmospheric Ozone. *Workshop on Atmospheric Ozone*. Downs view, Ontario: Ontario Climate Advisory Committee.

McElroy, C.T. et al., 1998. Evidence for the presence of BrO in the free troposphere during the Arctic polar sunrise. *Nature*, sous presse.

Newman, P.A., J. Gleason, et al., 1997. Anomalous low ozone over the Arctic. *Geophysical Research Letters*, **24**, 2689-2692.

Organisation météorologique mondiale, 1999. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998. Genève: Organisation météorologique mondiale, sous presse.

Rex, M., P.B. von der Gathen, et al., 1998. In situ measurements of stratospheric ozone depletion rates in the Arctic winter 1991/1992: a Lagrangian approach. *Journal of Geophysical Research*, **103**, 5843-5853.

Shindell, D.T., et al., 1998. Increased polar stratospheric ozone losses and delayed eventual recovery owing to increasing greenhouse-gas concentrations. *Nature*, **392**, 589-592.

Wardle, D.L., 1997. Trends in ozone over Canada, ozone-depleting substances, and the UV-B. Pages 66-74 in *Emerging Air Issues of the 21st Century, Actes d'une conférence tenue à Calgary, en Alberta, en septembre 1997*. Pittsburg: Air and Waste Management Association.

Wardle, D.L., J.B. Kerr, C.T. McElroy et D.R. Francis, 1997. La science de l'ozone: perspective canadienne sur la couche d'ozone. Downs view, Ontario: Environnement Canada.

Wernberg P.O., et al., 1998. Hydrogen radicals, nitrogen radicals, and the production of ozone in the upper troposphere. *Science*, **279**, 49-53.

