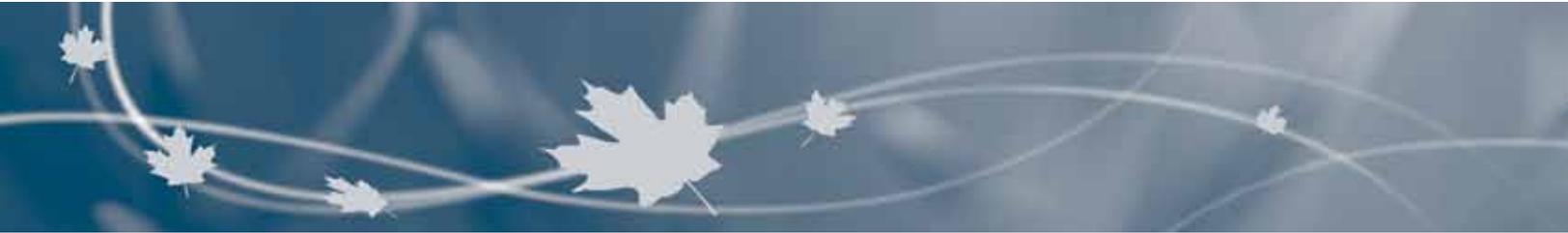




Environnement
Canada

Environment
Canada



La couche d'ozone de l'Arctique

*Les réactions de la couche d'ozone de l'Arctique
aux substances destructrices de l'ozone et aux
changements climatiques*



Les photographies sont la propriété des archives d'images ARQX d'Environnement Canada. Une permission spéciale a été obtenue de la part de Mike Harwood (p. vii : Bœufs musqués sur l'île d'Ellesmere), Richard Mittermeier (pp. vii, 12 : Coucher du soleil vu du Polar Environment Atmospheric Research Laboratory d'Eureka, au Nunavut), Angus Fergusson (p. 4 : Iqaluit; p. 8: L'île de Baffin), Yukio Makino (p. vii : Instruments et scientifique sur le toit du Polar Environment Atmospheric Research Laboratory), Tomohiro Nagai (p. 25 : Figure 20) et John Bird (p. 30 : le Polar Environment Atmospheric Research Laboratory).

Pour obtenir des exemplaires supplémentaires du présent rapport, s'adresser à :

Angus Fergusson
Science des évaluations scientifiques
Division de l'intégration des sciences et de la technologie
Environnement Canada
4905, rue Dufferin
Toronto (Ontario) M3H 5T4
Canada

Prière de faire parvenir vos réactions, commentaires et suggestions à Angus.Fergusson@ec.gc.ca

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre de l'Environnement, 2010.

N° de catalogue : En164-18/2009F
ISBN : 978-0-662-08677-2

Also available in English

La couche d'ozone de l'Arctique

*Les réactions de la couche d'ozone de l'Arctique
aux substances destructrices de l'ozone et aux
changements climatiques*

Angus Fergusson



Remerciements



L'auteur tient à remercier David Wardle, Ted Shepherd, Norm McFarlane, Nathan Gillett, John Scinocca, Darrell Piekarz, Ed Hare, Elizabeth Bush, Jacinthe Lacroix et Hans Fast de leur aide et de leurs conseils précieux lors de la préparation de ce document.



Table des matières

 Résumé	v
 Introduction	1
 Le régime naturel de l'ozone et l'Arctique	5
 Les substances appauvrissant la couche d'ozone et leur impact sur la couche d'ozone de l'Arctique	9
 Autres facteurs influant sur l'appauvrissement de l'ozone dans l'Arctique	13
 Liens entre les changements climatiques et la couche d'ozone	17
 Recherches et observations : l'état de la couche d'ozone de l'Arctique	23
 L'avenir de la couche d'ozone de l'Arctique	31
 Liens utiles	34
 Bibliographie	35
 Glossaire	36
 Notes	37



*Vue vers le nord à
l'île d'Ellesmere, au Nunavut*

Résumé

Lorsque le rapport *Arctic Ozone: The Sensitivity of the Ozone Layer to Chemical Depletion and Climate Change* a été publié en 1998, il s'appuyait sur des recherches effectuées entre les années 1960 et le milieu des années 1990. Dans la dernière décennie, la science de l'appauvrissement de l'ozone a connu des progrès considérables, que ce soit en matière de surveillance et d'observation, d'analyse ou de modélisation informatique. Le présent rapport remet à jour la science en examinant comment la couche d'ozone de l'Arctique a évolué depuis 1998. Les informations les plus récentes reposent sur les travaux mentionnés dans les documents suivants : *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006*, de l'Organisation météorologique mondiale, *Environmental Effects of Ozone Depletion and its Interactions with Climate Change*, 2006, du Programme des Nations Unies pour l'environnement, *Arctic Climate Impact Assessment* (2005) et le numéro spécial de mars 2008 d'*Atmosphere-Ocean*, intitulé « La science de l'ozone en 2007 : une perspective canadienne sur l'ozone dans l'atmosphère en changement ».

Au cours des années 1990, période où l'atmosphère de l'Arctique était plus froide qu'habituellement, les scientifiques ont observé des pertes d'ozone généralisées sur l'Arctique, et craignaient que les épisodes de grave appauvrissement de l'ozone ne deviennent encore plus fréquents. Ils s'inquiétaient également que les pertes d'ozone sur l'Arctique ne se répercutent au-dessus des latitudes moyennes à cause du mélange des masses d'air. On pensait en effet que les concentrations de substances contenant des atomes de chlore ou de brome et destructrices de l'ozone devaient atteindre leur maximum à la fin du XX^e siècle et que le refroidissement de la stratosphère de l'Arctique causé par une augmentation de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère y rendrait les conditions plus favorables à l'appauvrissement de l'ozone qu'elles ne l'avaient jamais été. Autrement dit, on s'attendait à ce que, à la fin du XX^e siècle, l'Arctique soit vulnérable à un appauvrissement important de l'ozone pendant encore une vingtaine d'années.

Or, depuis 2000, les scientifiques ont observé des changements de l'ozone total et des températures dans l'atmosphère de l'hémisphère Nord. Les valeurs de

l'ozone total y ont inversé leur tendance à la baisse aux alentours de 2000 et ont augmenté à un rythme plus élevé que ne le laissait penser le changement de la concentration atmosphérique de substances appauvrissant la couche d'ozone. Sur la même période, il a continué à y avoir des épisodes de grave appauvrissement de l'ozone dans l'Arctique pendant les années anormalement froides, mais l'intensité des années froides a diminué (Fioletov, 2008). Bien que l'appauvrissement de l'ozone se poursuive, il n'atteint pas les mêmes proportions qu'avant 2000. La raison pourrait être un renforcement de la circulation stratosphérique, qui fait augmenter l'abondance d'ozone stratosphérique dans l'Arctique et augmente la température de la stratosphère. Ce changement pourrait être causé en partie par l'augmentation de la circulation de l'énergie dans la stratosphère, elle-même attribuable à l'augmentation des gaz à effet de serre, ou à la variabilité naturelle.

Les recherches ont montré que les fortes augmentations du rayonnement ultraviolet atteignant la surface de la Terre en raison de l'appauvrissement aigu de l'ozone ont des effets très nocifs sur les formes de vie arctiques sensibles. Lors des années anormalement froides, les niveaux de l'ozone dans l'Arctique se trouvaient entre 30 et 60 % sous la normale au printemps, ce qui entraînait une augmentation correspondante, mais un peu plus élevée, du rayonnement ultraviolet à la surface de la Terre. Bien que les niveaux d'ultraviolets soient généralement très bas dans l'Arctique au printemps, cette augmentation a soulevé des inquiétudes quant à ses impacts sur les êtres humains et sur l'environnement, par exemple un accroissement de l'incidence de coups de soleil et d'ophtalmie des neiges qu'on n'observait pas auparavant. Le réchauffement du climat nordique a accompagné une baisse de l'étendue de la couverture glacielle et nivale dans les régions polaires et subpolaires. Comme la glace et la neige atténuent considérablement la pénétration du rayonnement ultraviolet dans la colonne d'eau, le rétrécissement extrême de la couverture de glace de mer et de neige qui est survenu à la fin de l'été 2007 et en 2008 a modifié l'exposition des écosystèmes aquatiques au rayonnement ultraviolet. Il a été montré que l'augmentation de ce rayonnement portait atteinte aux organismes qui vivent près de la surface de l'eau pendant leurs premiers stades biologiques.

Tant dans l'Arctique qu'en Antarctique, les importantes pertes d'ozone sont imputables à des conditions météorologiques particulières qui se produisent en hiver et au début du printemps dans les régions polaires. Dans chaque hémisphère, à l'arrivée de l'hiver, il se forme autour des pôles un vortex de vents qui isole la stratosphère polaire. Sans l'apport d'air plus doux en provenance des latitudes plus basses et en l'absence de lumière solaire, l'air emprisonné dans le vortex devient très froid. Aux températures de -78 °C ou moins, des nuages composés de glace, d'acide nitrique et d'acide sulfurique commencent à se former dans la stratosphère; ce sont les nuages stratosphériques polaires (NSP). Ces nuages donnent lieu à une série de réactions chimiques qui détruisent l'ozone plus efficacement que celles qui se produisent dans de l'air plus chaud. Une fois les NSP formés, la destruction de l'ozone commence avec le retour de la lumière solaire au printemps. D'abord, une série de réactions chimiques libère le chlore par photolyse. La destruction se poursuit rapidement, jusqu'à épuisement de tout l'ozone présent. À mesure que l'atmosphère se réchauffe lentement au printemps, le vortex se dissipe et les températures plus douces empêchent qu'il ne se forme de nouveaux NSP.

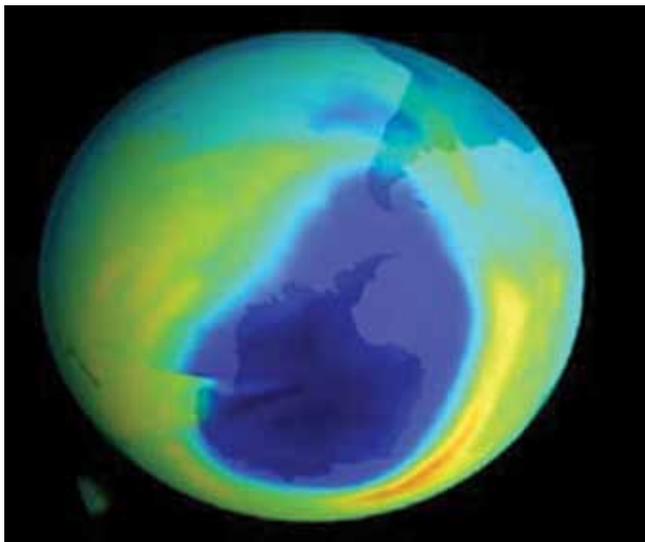


Figure 1. Le trou d'ozone dans l'Antarctique a atteint sa taille maximale de 27 millions de km^2 en octobre 2000.

Source : National Aeronautics and Space Administration

Sur l'Antarctique, ces processus entraînent généralement la formation d'un énorme trou d'ozone chaque printemps, comme le montre la figure 1. Sur l'Arctique, des processus semblables interviennent, mais les quantités d'ozone n'y ont jamais diminué autant qu'on a

pu l'observer en Antarctique. Cela s'explique en partie du fait que l'Arctique présente une plus forte concentration d'ozone à la fin de l'hiver et au printemps. De plus, la circulation atmosphérique de l'hémisphère Nord, variable, rend le vortex de l'Arctique moins stable. Par conséquent, les incursions d'air du sud maintiennent souvent la stratosphère de l'Arctique à une température trop élevée pour que se forment des NSP.

L'appauvrissement de l'ozone de l'Arctique restera préoccupant dans les décennies à venir, étant donné la forte concentration atmosphérique de substances anthropiques appauvrissant la couche d'ozone et la variabilité des conditions météorologiques dans la région. Des mesures de limitation ont été mises en place en application du Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone en vue de cesser graduellement la production de ces substances. Il faudra entre 50 et 100 ans pour que ces produits disparaissent de l'atmosphère, étant donné que les substances destructrices de l'ozone ne se dégradent que très lentement. Il demeure des incertitudes quant à la gravité de l'impact des changements climatiques causés par l'accumulation croissante dans l'atmosphère de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone, le méthane, les oxydes d'azote et les halocarbures. Les changements induits dans les mécanismes radiatifs et chimiques par ces augmentations des gaz à effet de serre influenceront sur l'ozone stratosphérique. En outre, la circulation atmosphérique dans la stratosphère est en train de changer sous l'effet des modifications du climat de la troposphère (Shepherd, 2008), ce qui comporte des implications pour l'ozone et le rayonnement ultraviolet. En fait, bien que l'accumulation de ces gaz entraîne un réchauffement de la basse atmosphère de la Terre, le dioxyde de carbone contribue aussi à un refroidissement de la haute stratosphère par un refroidissement radiatif plus efficace. Comme les températures de la stratosphère de l'Arctique descendent souvent jusqu'à quelques degrés du seuil de formation des NSP, avec un refroidissement supplémentaire de cette couche, il pourrait s'en former davantage, ce qui accroîtrait la gravité des pertes d'ozone. Des études menées à l'aide de modèles de l'atmosphère donnent à penser que cet effet pourrait soit retarder, soit accélérer le rétablissement de la couche d'ozone de l'Arctique.



Bœufs musqués sur l'Île d'Ellesmere, Nunavut.

Un certain nombre de phénomènes naturels influent eux aussi sur les niveaux d'ozone dans l'Arctique, sur des périodes se chiffrant selon le cas en jours ou en années. Il s'agit entre autres des systèmes météorologiques, de l'oscillation quasi-biennale (renversement périodique de la direction des vents dans la stratosphère au-dessus de l'équateur), de l'El Niño (oscillation australe), du cycle solaire (légères variations du rayonnement solaire liées au cycle des taches solaires) et des éruptions volcaniques.



Instruments et scientifique sur le toit du Polar Environment Atmospheric Research Laboratory.

Il sera nécessaire de poursuivre les activités de recherche et de surveillance visant l'ozone stratosphérique pour mieux comprendre les processus d'appauvrissement et être en mesure de mieux prévoir les réactions possibles de la couche d'ozone à l'évolution des conditions atmosphériques et autres facteurs d'agression. La participation du Canada à ces activités témoigne de ses préoccupations particulières, en tant que pays polaire nordique, face au devenir de la couche d'ozone de l'Arctique.

La manière dont la couche d'ozone de l'Arctique évoluera à l'avenir dépendra non seulement de l'élimination des substances destructrices de l'ozone, mais aussi de la limitation des gaz à effet de serre et autres polluants. Ces problèmes sont liés; il est donc scientifiquement sensé de les traiter dans le cadre d'une approche intégrée et globale.



Coucher de soleil vu du Polar Environment Atmospheric Research Laboratory d'Eureka, au Nunavut.



*Coucher de soleil sur le
spectrophotomètre Brewer,
Eureka, Nunavut*

Introduction

Depuis les années 1980, l'appauvrissement de la couche d'ozone de l'Arctique a soulevé de graves préoccupations, étant donné la sensibilité de la santé humaine et de l'environnement à une augmentation du rayonnement ultraviolet (UV) : des niveaux élevés de rayonnement ultraviolet auront en effet une incidence sur les populations qui vivent dans l'Arctique et sur les écosystèmes de cette région (Arctic Climate Impact Assessment, 2005).

En 1992, Environnement Canada a élaboré l'indice UV pour fournir aux Canadiens des mises à jour sur l'état de la couche d'ozone et les informer sur l'intensité du rayonnement ultraviolet érythémogène (qui cause les coups de soleil) qui atteint la surface de la Terre. Au Canada, l'indice UV se situe entre 0 et 11, 11 étant une valeur extrême de l'intensité en juin sur le sud de l'Ontario. Dans l'Arctique, il est normalement bas la plus grande partie de l'année, atteignant des valeurs modérées

pendant l'été, comme le montre la figure 2 pour Resolute Bay, au Nunavut. Cependant, même si le rayonnement ultraviolet est normalement faible dans l'Arctique, il y est réfléchi par la neige et les nuages, ce qui en fait augmenter la force et l'impact. Par exemple, en se réfléchissant sur de la neige fraîche, la quantité d'ultraviolets peut presque doubler, et ainsi causer des coups de soleil et affecter la vue chez l'homme.

L'autre domaine très préoccupant est la réduction de l'étendue et de l'épaisseur de la glace de mer qu'on observe en été depuis quelques décennies. Cette perte de la glace de mer permet au rayonnement ultraviolet de pénétrer dans la colonne d'eau et fait croître l'exposition des écosystèmes aquatiques aux UV.

Les écologues s'inquiètent beaucoup des effets que pourraient avoir sur les espèces animales et végétales de l'Arctique les appauvrissements importants de l'ozone et l'augmentation du rayonnement ultraviolet qui les

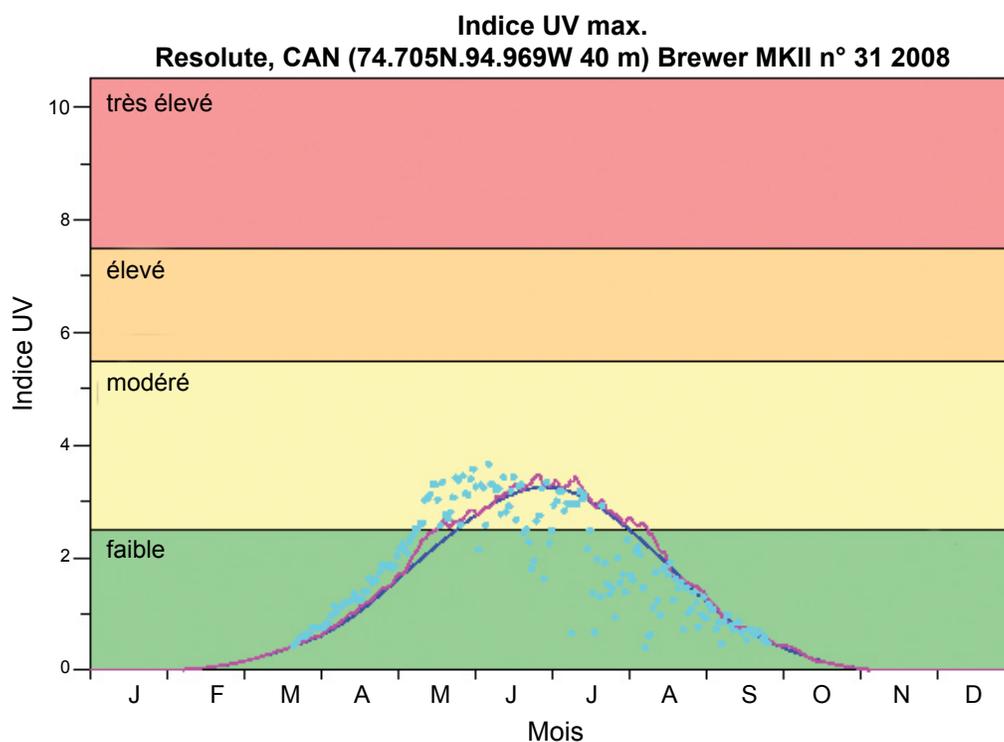


Figure 2. Indice ultraviolet maximum quotidien à Resolute Bay, au Nunavut, en 2008.

Source : Archives préliminaires

accompagne. Comme l'évolution des espèces vivant dans l'Arctique a pris place dans un environnement où les niveaux de rayonnement ultraviolet sont normalement faibles, ces organismes peuvent être très sensibles à un accroissement du rayonnement qui atteint la surface de la Terre pendant les épisodes d'appauvrissement notable de l'ozone.

La couche d'ozone de l'Arctique a connu de graves appauvrissements pendant 10 des 18 années écoulées depuis 1990, tous survenus lorsque la stratosphère arctique était anormalement froide. Bien que les concentrations atmosphériques élevées de substances destructrices de l'ozone donnent lieu à l'appauvrissement de l'ozone, des températures inférieures à -78°C et une circulation stable dans l'atmosphère de l'Arctique pendant une longue période à la fin de l'hiver et au printemps peuvent rendre les conditions propices à un grave appauvrissement. La circulation stable limite la possibilité d'une incursion d'air chaud en provenance des latitudes moyennes, phénomène appelé « réchauffement stratosphérique soudain ». Les basses températures favorisent la formation de nuages stratosphériques polaires, qui fournissent une surface sur laquelle les composés stables se dissocient en substances instables. Avec l'apport d'énergie fourni par la lumière solaire, celles-ci se décomposent rapidement et libèrent les atomes de chlore et de brome qui détruisent l'ozone.

Bien que la situation perdure, on a observé une baisse de l'intensité des années très froides depuis 2000. L'atmosphère de l'Arctique semble se réchauffer et il y a moins d'épisodes de grave appauvrissement de l'ozone. Cet état de choses pourrait être attribuable à une augmentation de la circulation dans la stratosphère, qui entraîne davantage d'air et d'ozone des tropiques vers le pôle. L'air chaud subit un réchauffement adiabatique à mesure qu'il traverse la stratosphère pour gagner la troposphère dans la région du pôle. Le résultat en a été une diminution du nombre d'années très froides dans l'Arctique et du nombre d'hivers connaissant un grave appauvrissement de l'ozone. Les évaluations scientifiques donnent à penser que, dans les 10 à 20 prochaines années, l'atmosphère de l'Arctique restera vulnérable à un appauvrissement de l'ozone pendant les années anormalement froides. Les années où elle est chaude, l'appauvrissement de l'ozone se situera à des niveaux semblables à ceux des latitudes moyennes.

Les taux d'appauvrissement de l'ozone dans l'Arctique n'ont jamais atteint ceux de l'Antarctique. En effet, d'importants trous se forment dans la couche d'ozone de

l'Antarctique presque chaque printemps depuis 1982, leur superficie maximum ayant été de 29 millions de kilomètres carrés en 2000. En comparaison, l'appauvrissement de l'ozone n'a été grave dans l'Arctique que pendant les années très froides. Par exemple, comme le montre la figure 3, ce fut le cas en 1997, où l'ozone est tombé certains jours de plus de 45 % par rapport aux niveaux d'avant 1980. En Suède, au printemps 2000, la perte d'ozone observée a atteint 70 % à l'altitude de 20 km; on a en outre estimé à 40 % les pertes d'ozone au-dessus du Groenland pendant les 10 premiers jours de mars 2005.

Les concentrations stratosphériques de substances destructrices de l'ozone connues ont culminé entre 1995 et 2000, et sont restées proches de ces niveaux dans les dix années suivantes, en raison de la longue durée de vie de ces substances dans l'atmosphère. Cependant, d'autres forces entrent en jeu dans l'atmosphère de l'Arctique. La perte d'ozone dans la stratosphère au-dessus du pôle fait que cette couche se refroidit, puisque l'ozone absorbe la lumière solaire. En outre, le changement climatique induit par l'accumulation de gaz à effet de serre peut causer dans la stratosphère de l'Arctique des modifications susceptibles d'y rendre les phénomènes d'appauvrissement de l'ozone plus intenses pendant les hivers anormalement froids. Les épisodes d'appauvrissement grave de l'ozone dans l'Arctique ont aussi des incidences sur les niveaux de ce gaz à d'autres endroits de l'hémisphère Nord. Après un de ces épisodes, l'air arctique appauvri en ozone se mélange à de l'air situé plus au sud et en abaisse la teneur en ozone. En fait, les régions polaires, dont les processus atmosphériques sont uniques, peuvent avoir une incidence sur la vitesse de rétablissement de la couche d'ozone à l'échelle mondiale.

Étant donné l'étendue de ses territoires nordiques, le gouvernement du Canada se préoccupe particulièrement de l'avenir de la couche d'ozone de l'Arctique. Il a donc mené de vastes travaux de surveillance et de recherche pour mesurer les tendances et changements de la stratosphère arctique. Les scientifiques canadiens ont également accordé une priorité élevée à la collaboration avec leurs homologues du monde entier en vue d'améliorer la compréhension scientifique des processus qui influent sur l'ozone de l'Arctique et de la planète en général.

Le présent rapport résume les connaissances actuelles sur l'état de la couche d'ozone de l'Arctique et sur les processus qui la régissent. Certains de ces processus sont naturels et participent aux variations quotidiennes,

saisonniers et annuelles normales de la concentration d'ozone. D'autres sont liés à des polluants destructeurs de l'ozone anthropiques, et entraînent des changements à long terme dans la couche d'ozone. Il existe aussi des liens cruciaux entre la destruction de l'ozone dans l'Arctique et les changements qui surviennent dans la stratosphère sous l'effet des changements climatiques. Les limitations adoptées en application du Protocole de Montréal de 1987 relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone devraient à terme réparer une

grande partie des dommages infligés. Cependant, la possibilité que l'appauvrissement de l'ozone de l'Arctique n'empire avant ce rétablissement dépend des interactions complexes de tous ces éléments et du degré auquel les Parties honoreront leurs obligations aux termes du Protocole de Montréal. Si toutes les Parties le respectent et si notre compréhension scientifique actuelle de la situation s'avère exacte, on pourrait s'attendre à ce que la couche d'ozone de l'Arctique revienne aux conditions observées avant 1980 d'ici le milieu du présent siècle.

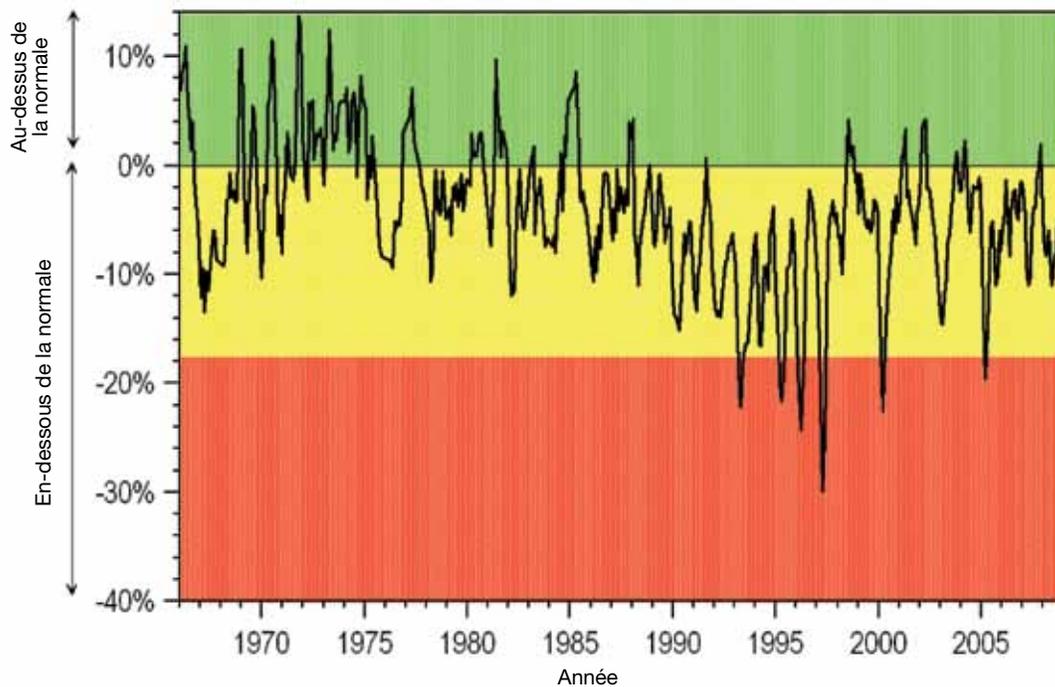


Figure 3. Écarts par rapport à la normale de l'ozone total sur l'Arctique canadien, de 1965 à 2009.
Source : Fioletov, 2008.



Iqaluit, Nunavut, Mars 2007

Le régime naturel de l'ozone et l'Arctique

L'ozone se forme dans la stratosphère (couche de l'atmosphère située entre 10 km 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. C'est aussi le rayonnement solaire qui finit par détruire l'ozone, lors de réactions faisant intervenir le chlore, le brome, 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 est constante. En fait, elle varie considérablement d'une journée, d'une saison, d'une année et d'un endroit à l'autre (figure 4); 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 (DU), 100 DU correspondant à 1 mm d'ozone dans les conditions normales de température (0 °C) et de pression à la surface (1013,25 millibars, ou une atmosphère ou « atm »). La plus grande partie de cet ozone se trouve dans la couche d'ozone stratosphérique, mais il y en a aussi un peu (environ 10%) à proximité de la surface, qui y a été amené par les courants provenant de la stratosphère ou qui 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 5).

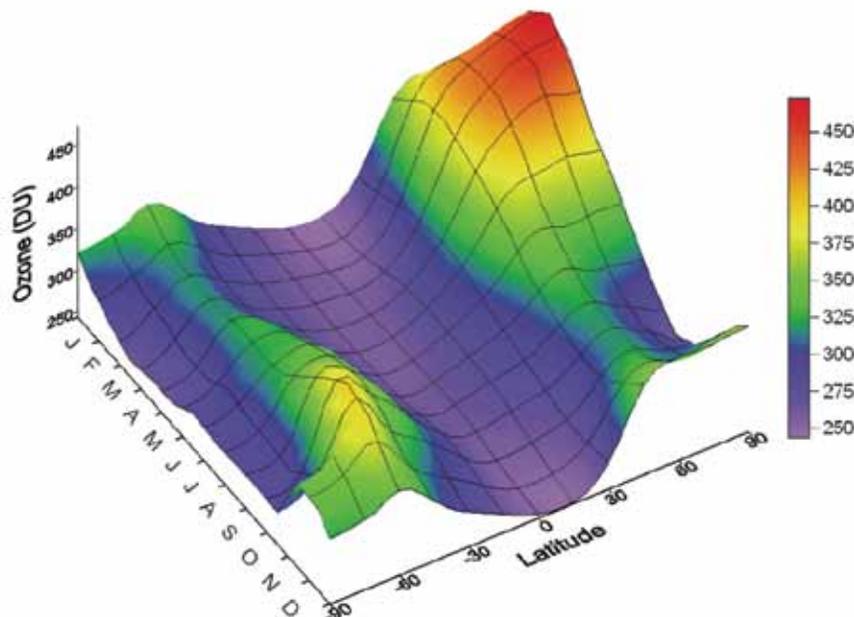


Figure 4. Graphique de surface pour l'ozone total en moyenne zonale, en fonction de la latitude et du mois, estimé à partir de mesures au sol, pour la période de 1964 à 1980.

Source : Fioletov, 2008

Ozone total moyen (DU), 2008/03/01-2008/03/10

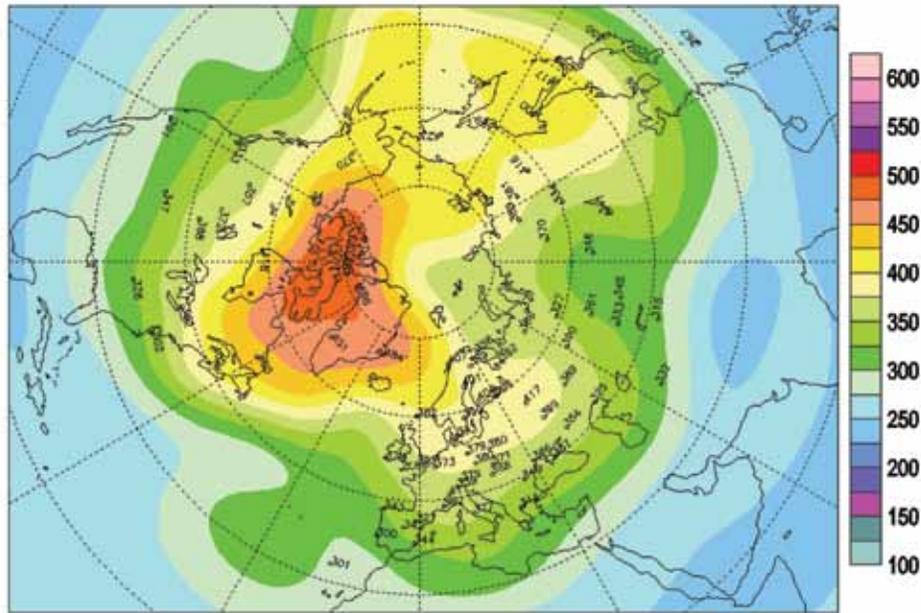


Figure 5. Ozone total moyen sur l'hémisphère Nord, du 1^{er} au 10 mars 2008.

Source : WOUDC

Il peut sembler surprenant de 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 au cours de 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 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 (figure 6). La stratosphère est située au-dessus de la troposphère, qui est la couche inférieure de l'atmosphère, plus turbulente, où se produisent les phénomènes 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 la géographie et à la météorologie de



Station météorologique de l'extrême-Arctique à Eureka.

l'hémisphère Sud, qui influencent les vents stratosphériques circulant des tropiques au pôle Sud. L'élément vertical et nord-sud de la circulation des vents dans la stratosphère – l'air s'élève dans les tropiques, se déplace vers le pôle aux latitudes moyennes et redescend dans la région polaire – est connu sous le nom de circulation Brewer-Dobson.

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 l'ordre de 450 dobsons au début de printemps à environ 300 dobsons en octobre.

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. À l'arrivée du printemps, les valeurs d'ozone atteignent 450 dobsons ou plus. Le retour du soleil,

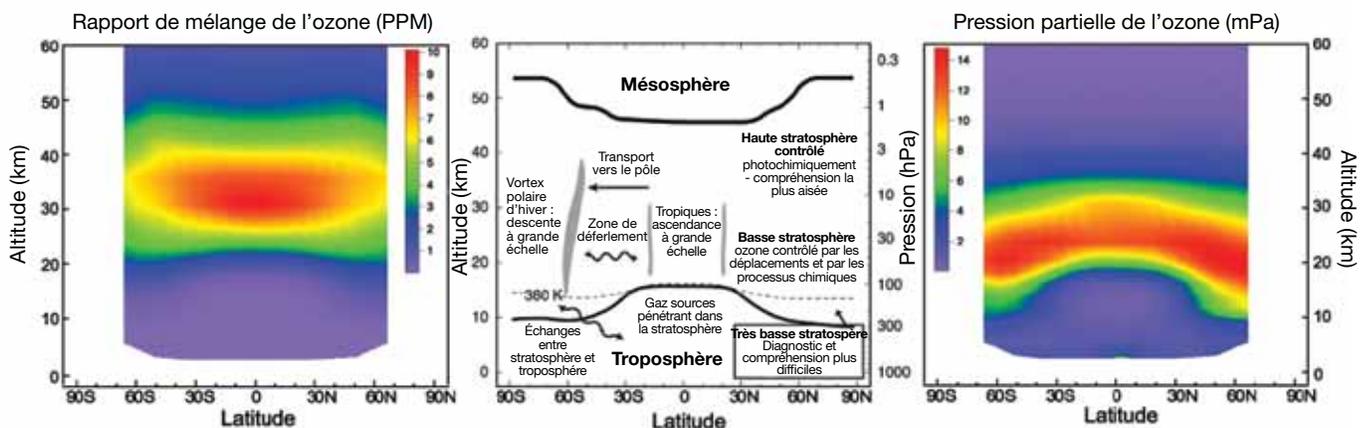


Figure 6. Panneau de gauche : Rapport de mélange de l'ozone annuel moyen (concentration d'ozone, soit le nombre de molécules d'ozone par million de molécules d'air). Panneau du centre : Schéma de la structure et de la circulation atmosphérique de l'ozone des tropiques vers les pôles. Panneau de droite : Pression moyenne créée dans l'atmosphère par l'ozone seul et illustrant la structure et la concentration de ce gaz.

Source : Fioletov, 2008



*Île de Baffin
dans l'Arctique canadien, mars 2007*

Les substances appauvrissant la couche d'ozone et leur impact sur la couche d'ozone de l'Arctique

La couche d'ozone s'est formée autour de la Terre il y a quelque deux milliards d'années, et elle est restée relativement stable depuis. Au milieu des années 1970, des scientifiques ont découvert que des substances chimiques industrielles, comme les chlorurofluorocarbones (autrefois appelés chlorofluorocarbones), avaient une incidence sur l'équilibre chimique de la haute atmosphère, entraînant une accélération de la destruction de l'ozone. L'appauvrissement de la couche d'ozone est dû au fait que les activités humaines ont fait augmenter l'abondance naturelle des substances appauvrissant la couche d'ozone (SACO) dans la stratosphère, ce qui a engendré une accélération de la destruction de l'ozone stratosphérique par rapport à la vitesse naturelle de remplacement. Les SACO sont stables dans la basse atmosphère, mais elles se dégradent sous l'effet de l'intense rayonnement ultraviolet de la haute stratosphère et libèrent leurs atomes de chlore ou de brome. Les SACO issues des activités humaines sont les chlorurofluorocarbones, les hydrurochlorurofluorocarbones (autrefois appelés hydrochlorofluorocarbones), le tétrachlorure de carbone, le méthyl chloroforme, le chlorure de méthyle et le bromure de méthyle. De ces substances, seuls le chlorure de méthyle et le bromure de méthyle se trouvent naturellement présents dans l'environnement en plus d'être des produits chimiques d'usage industriel.

Les chlorurofluorocarbones sont des produits chimiques qui se prêtent à de multiples emplois et qui ont été largement utilisés comme réfrigérants, mousses et propulseurs d'aérosols, et dans toute une gamme d'applications industrielles. Ce sont également les principales SACO présentes dans la stratosphère, à l'origine de la plus grande augmentation du pourcentage de chlore dans l'atmosphère. Les halons et le bromure de méthyle sont également d'importantes SACO contenant des atomes de brome et dont les concentrations dans l'atmosphère se sont accrues au cours des dernières années. L'atome de brome détruit l'ozone stratosphérique avec une efficacité 60 fois supérieure à celle de l'atome de chlore, mais on le trouve en bien plus faibles concentrations. Les halons ont surtout été utilisés dans les extincteurs, tandis que le bromure de méthyle est toujours utilisé comme fumigant et pesticide.

La plupart de ces SACO peuvent persister pendant de nombreuses années, se mélangeant de manière horizontale et verticale dans la basse atmosphère. Les mouvements de l'air ou la convection finissent par faire monter les produits chimiques vers la tropopause, d'où ils poursuivent leur ascension dans la stratosphère, entraînés par la circulation Brewer-Dobson ou d'autres forces dynamiques. Ensuite, ces composés montent graduellement au-dessus de la couche d'ozone et sont dissociés sous l'effet de l'intense rayonnement ultraviolet du Soleil, ce qui libère leurs atomes de chlore ou de brome. 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 participer à ces réactions. Par conséquent, un seul atome de chlore ou de brome peut détruire des milliers de molécules d'ozone avant de redescendre dans la troposphère et d'être capturé par d'autres réactions chimiques. On estime que la teneur en chlore de l'atmosphère est passée d'un état naturel de 0,5 partie par milliard avant l'invention des chlorurofluorocarbones à 3,5 parties par milliard en 1994.

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 fermée qui se développe au-dessus des pôles au début de l'hiver, isolant l'air du pôle de celui des latitudes moyennes. 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 -78 °C ou moins. À ces températures, un second facteur intervient : l'apparition de nuages stratosphériques polaires (NSP), formés de glace, d'acide nitrique et d'acide sulfurique. En l'absence de NSP, 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 NSP entraînent cependant la dissociation de ces composés, les atomes de chlore et de brome se retrouvant dans des composés moins stables. Lorsque le soleil revient, au printemps, ces composés sont dissociés par le

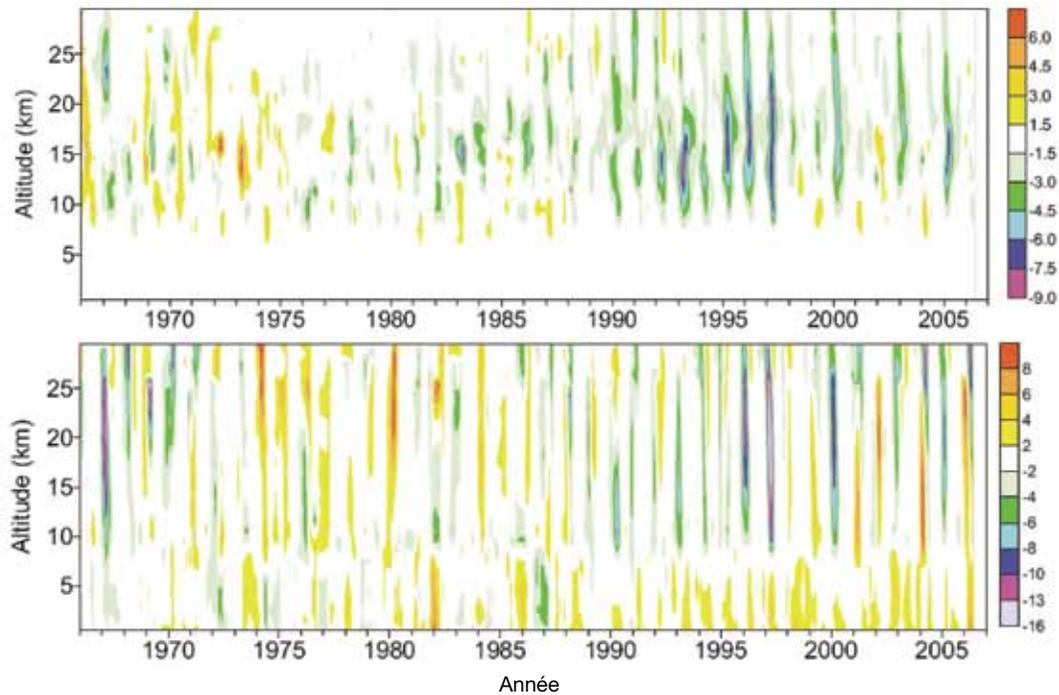


Figure 7. Écarts, en dobsons par kilomètre, de l’ozone par rapport à la normale (panneau du haut) et écarts, en degrés Celsius, de la température par rapport à la normale, au-dessus de Resolute, Eureka et Alert, au Nunavut (panneau du bas) : moyennes mobiles sur trois mois. Les panneaux montrent l’étroite corrélation entre l’appauvrissement généralisé de l’ozone (bleu foncé dans le panneau du haut) et des températures de la stratosphère inférieures à $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Source : Fioletov, 2008

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 NSP, 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 se produisent (figure 7). 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 total sont inférieures à 220 dobsons). Ce trou ne se comble qu’une fois que le vortex hivernal s’est dissipé, ce qui permet le retour d’air des tropiques riche en ozone, et que les températures plus élevées empêchent la formation de NSP. Dans l’Arctique, les mêmes processus intensifient l’appauvrissement, mais des études montrent que les conditions entraînant l’appauvrissement de la

couche d’ozone n’y auront jamais la même ampleur que dans l’Antarctique. La différence tient en grande partie au fait 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 régimes d’écoulement stratosphériques apportant de l’ozone et de l’air plus chaud du sud, comme l’illustre la figure 8. Cette figure présente la température moyenne zonale, qui correspond à l’élément de température moyen le long du parallèle local de latitude. Ces épisodes, appelés réchauffements stratosphériques soudains, rendent souvent la stratosphère de l’Arctique trop chaude pour que des NSP puissent s’y former. Les NSP sont donc moins fréquents et persistent moins longtemps dans l’Arctique qu’en Antarctique. C’est pourquoi il n’y a jamais eu d’énorme trou d’ozone au-dessus de l’Arctique.

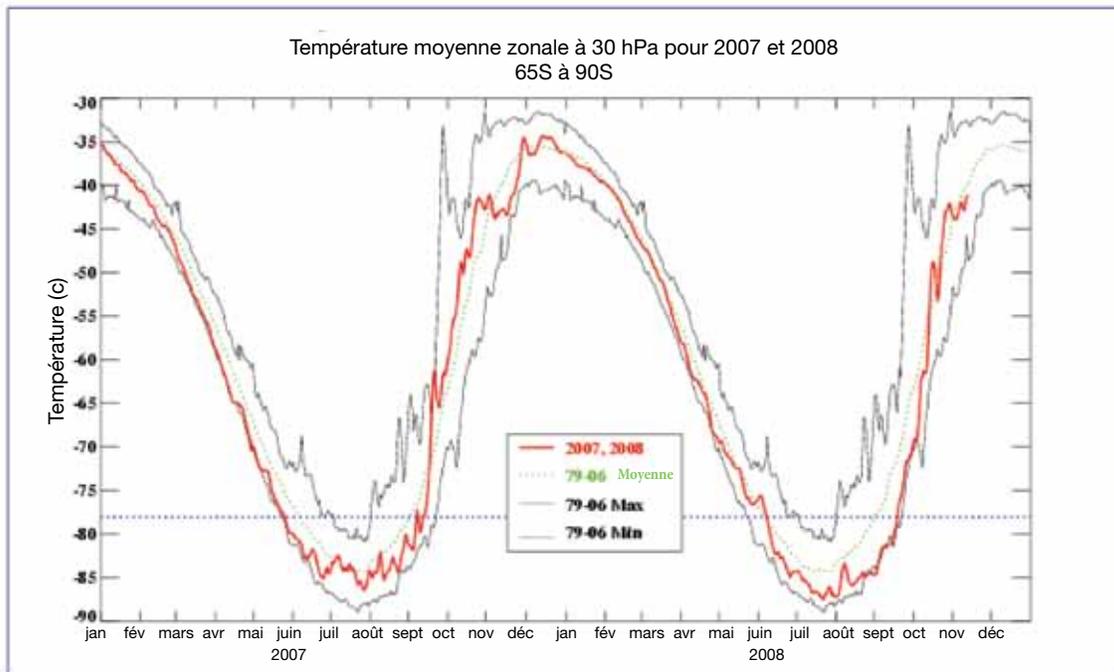
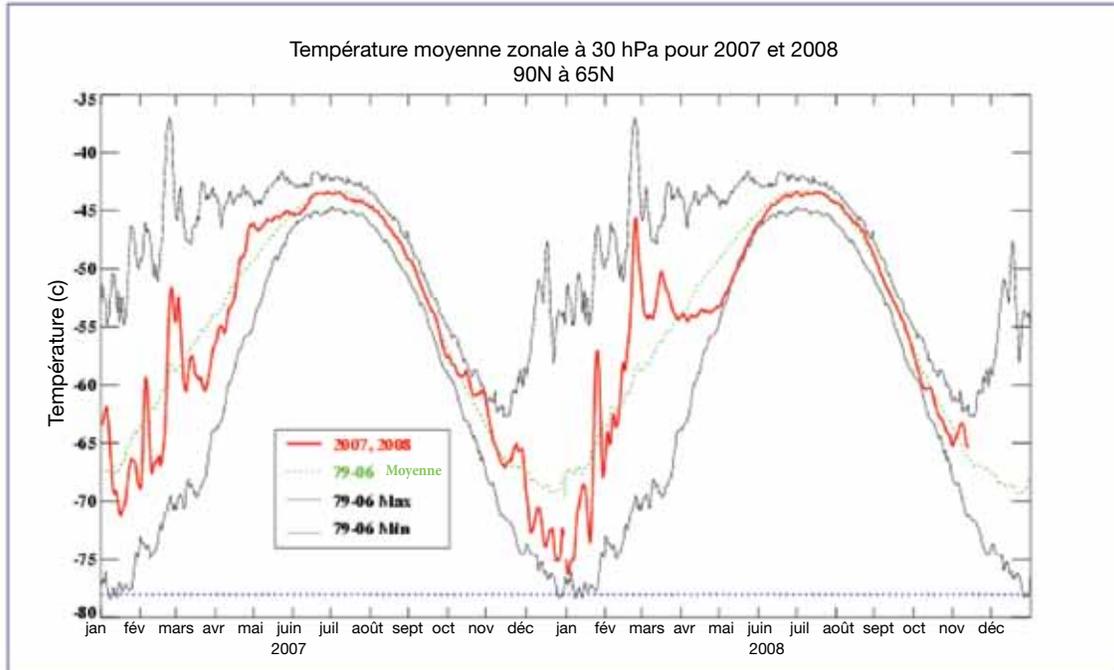


Figure 8. Températures minimales zonales pour 2007 et 2008 dans l'Arctique (panneau du haut) et en Antarctique (panneau du bas). Le réchauffement de la stratosphère de l'Arctique est très visible à la fin de février 2008. Par comparaison, en 2008, la stratosphère de l'Antarctique a été plus froide que la normale, et le réchauffement s'est produit à la fin du printemps quand le vortex s'est dissipé.

Source : Climate Prediction Center, National Oceanic and Atmospheric Administration



*Coucher de soleil vu
du Polar Environment
Atmospheric Research
Laboratory d'Eureka, au
Nunavut.*

Autres facteurs influant sur l'appauvrissement de l'ozone dans l'Arctique

Bien que ce soient les SACO 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 (jusqu'à 25 % du total moyen d'ozone) 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 le renversement 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. Beaucoup de ces processus influencent le flux d'ozone directement ou indirectement par l'intermédiaire d'autres processus. Par exemple, le cycle solaire a une incidence sur la pression atmosphérique et la circulation des vents, et donc sur la circulation de l'ozone dans la stratosphère. Les variations des ultraviolets solaires associées au cycle solaire ont une incidence directe sur la production d'ozone dans la haute stratosphère qui influence, à terme, l'ozone dans la basse stratosphère.

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, à partir du haut de la stratosphère et en descendant. Ce phénomène est connu sous le nom d'oscillation quasi-biennale (QBO). On n'en comprend pas totalement la cause, mais on suppose qu'elle est engendrée par la propagation ascendante d'énergie dans les vagues atmosphériques provenant de la troposphère. Elle influe sur divers paramètres de l'atmosphère, dont les quantités d'ozone aux latitudes moyennes et élevées. Quand la QBO est dans la phase d'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, 1997 et 2000, par exemple, la QBO était dans la phase d'ouest, et on a enregistré d'importantes pertes d'ozone dans l'Arctique. En 1994, 1996, 1998, 2005 et 2006, elle était dans la phase d'est. L'appauvrissement a été

minimum, comme prévu, en 1994, 1998 et 2006 mais, en 1996 et 2005, on a constaté des pertes atteignant jusqu'à 30 % et 45 %, respectivement. Ces résultats inattendus suggèrent que des facteurs autres que la QBO ont eu un effet plus marqué sur les niveaux d'ozone ces années-là.

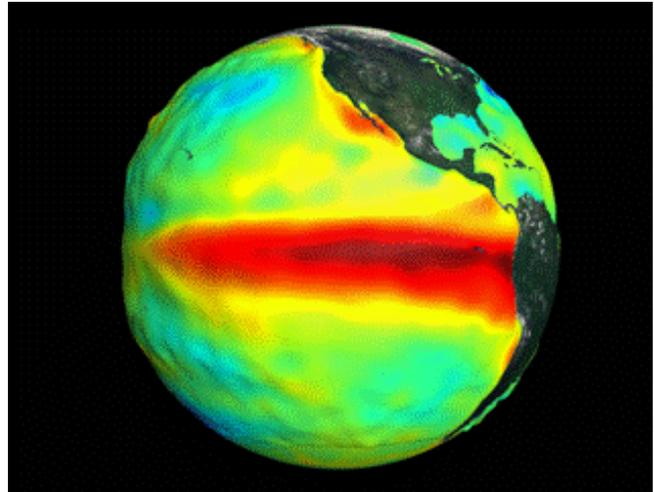


Figure 9. Réchauffement (en rouge) du Pacifique tropical sous l'effet du phénomène El Niño.

Source : NASA

El Niño-oscillation australe

Comme l'indique la figure 9, les épisodes El Niño sont des réchauffements 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 épisodes 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 dans 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. La dépression des Aléoutiennes 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 soudains qui y ont adouci les températures pendant l'hiver 1998. En rendant les conditions moins propices à la formation de NSP, 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. Depuis les épisodes El Niño de 1997 et 1998, ceux qui ont suivi, en 2002, 2004 et 2006, ont été généralement faibles.

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 sa surface (figure 10). 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 et, conséquemment, moins de rayons ultraviolets B atteignent la surface de la Terre. Les variations observées des quantités d'ozone sur le cycle sont d'environ 1 à 2 %.

Des études 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 NSP) et un renforcement du transport d'ozone vers les pôles. Ces conditions tendent toutes deux à faire baisser l'appauvrissement de l'ozone dans l'Arctique. Abstraction faite des autres facteurs, l'appauvrissement de l'ozone dans l'Arctique est donc susceptible d'être moindre les années de maximum du cycle solaire (comme ce fut le cas en 1968, 1979, 1990 et 2001, et le sera de nouveau en 2012 environ).

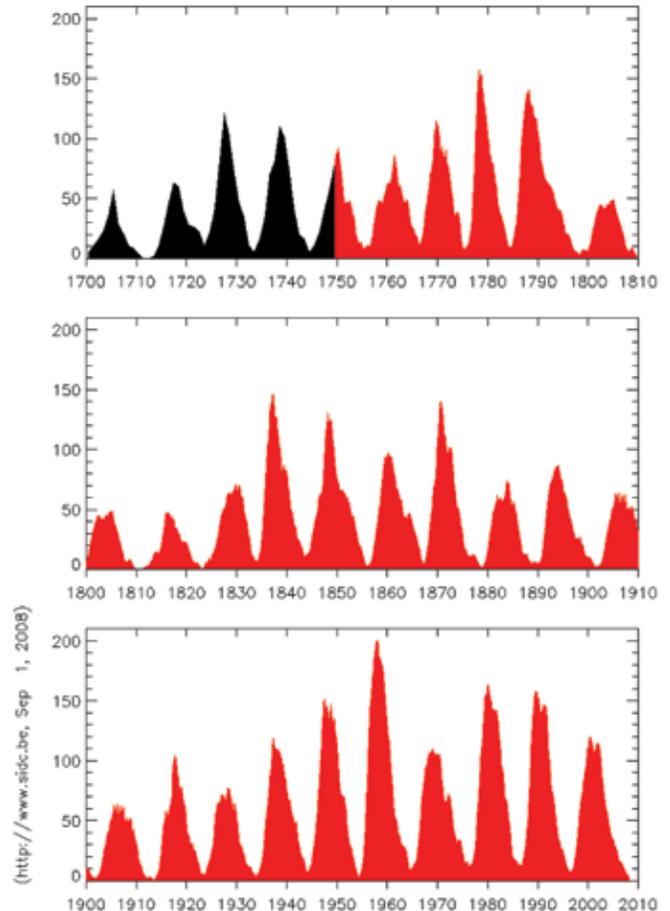


Figure 10. Le cycle des taches solaires a une période de 11 ans. Depuis le milieu du XVIII^e siècle, le nombre de taches présentes sur la surface du Soleil varie entre 50 et 200. Le cycle solaire influe sur la production d'ozone et sur la pression atmosphérique annuelle moyenne dans la stratosphère. Ces variations de pression modulent le transport de l'ozone vers les pôles : une plus grande quantité en est transportée dans l'Arctique lorsque le rayonnement solaire incident est à son maximum.

Source : Solar Influences Data Analysis Centre, 2008

Volcans

Les grandes éruptions volcaniques peuvent avoir une incidence considérable sur les températures de la stratosphère et l'appauvrissement de l'ozone, pendant une période d'un ou deux ans, comme le montre la figure 11. En effet, des réactions chimiques semblables à celles qui se produisent à la surface des NSP peuvent aussi avoir lieu à la surface des aérosols (petites gouttelettes ou particules) de sulfates, qui se forment dans la stratosphère à la suite des éruptions volcaniques. Ces aérosols peuvent également stimuler la formation de NSP par 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 survenues dans l'atmosphère. Au cours des deux années suivantes, on a observé un grave appauvrissement de l'ozone aux latitudes moyennes de l'hémisphère Nord. 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 dobsons, un minimum qu'on n'a revu qu'en 1997, pendant un épisode d'appauvrissement de l'ozone particulièrement intense.

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.

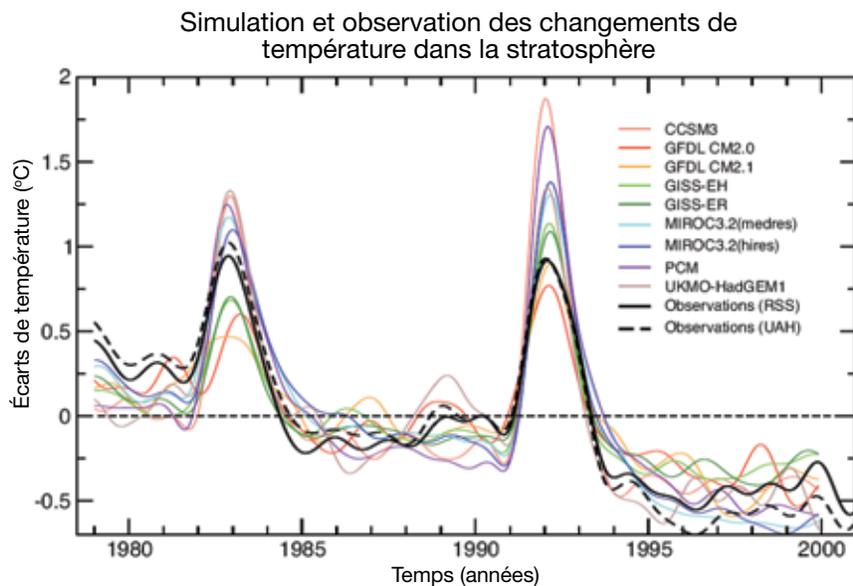


Figure 11. Variations de la température dans la basse stratosphère moyennées sur la planète et issues de divers modèles du climat et d'observations. Les éruptions de l'El Chichón en 1982 et du mont Pinatubo en 1991 ont injecté des aérosols sulfatés et des cendres dans la stratosphère, ce qui a au départ fait monter les températures de cette couche d'environ 1 °C. Elles ont aussi causé un refroidissement de la troposphère pendant plusieurs années, durant lesquelles les aérosols volcaniques absorbaient ou réfléchissaient le rayonnement solaire.
Source : Organisation météorologique mondiale, 2007



*Plantes en fleur
pendant le court été de l'Arctique,
à Eureka, au Nunavut*

Liens entre les changements climatiques et la couche d'ozone

On considère souvent que l'appauvrissement de l'ozone et les changements climatiques 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 phénomènes touchent la même atmosphère et, vu le jeu complexe des interactions et rétroactions qui caractérisent le comportement de celle-ci, il n'est pas surprenant que d'importants liens existent entre eux.

Certains de ces liens sont directs. Ainsi, les hydrocarbures halogénés, des gaz à effet de serre qui contribuent au réchauffement de la basse atmosphère, entraînent aussi l'appauvrissement de la couche d'ozone. Le dioxyde de carbone, un autre puissant gaz à effet de serre responsable du réchauffement de la basse atmosphère, entraîne en plus un refroidissement radiatif net de la stratosphère, ce qui peut jouer dans l'évolution de la couche d'ozone dans les régions polaires.

Il existe aussi de nombreux autres liens, plus subtils, entre les changements des régimes de circulation atmosphérique et les processus chimiques en jeu dans l'atmosphère. On note, par exemple, que les changements des températures océaniques et de la répartition de l'énergie dans l'atmosphère par suite du réchauffement de la basse atmosphère pourraient avoir pour effet de modifier la dynamique de la circulation atmosphérique ainsi que la vitesse des réactions et processus chimiques dans l'atmosphère. Ces relations sont de première importance pour comprendre l'évolution passée, présente et future de l'atmosphère résultant des gaz et produits chimiques qui s'y ajoutent.

Changements climatiques

Ces dernières années, les changements climatiques sont devenus une très sérieuse préoccupation en raison des effets néfastes qu'ils auront sur la vie sur Terre. Les activités humaines font monter les concentrations de gaz à effet de serre, comme le dioxyde de carbone, le méthane, l'oxyde de diazote, l'ozone et les hydrocarbures halogénés, bien au-dessus des seuils naturels. Or, il est largement reconnu aujourd'hui que l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre fait en sorte que la troposphère retient la chaleur, ce qui a pour effet d'élever la température moyenne de la surface de la Terre et de la basse atmosphère.

La figure 12 illustre la tendance des températures au Canada au cours des trente et des cinquante dernières années. Comme le montre la figure 12b, au Canada, les températures ont monté de plus de 1,3 °C dans les soixante dernières années. La plus forte hausse (allant jusqu'à 2,6 °C) a été enregistrée au cours des 30 dernières années, sur le secteur qui s'étend du Haut-Arctique à la région inférieure de la baie d'Hudson. En comparaison, la température de la Terre s'est élevée d'environ 0,74 °C pendant les cent dernières années (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2007).

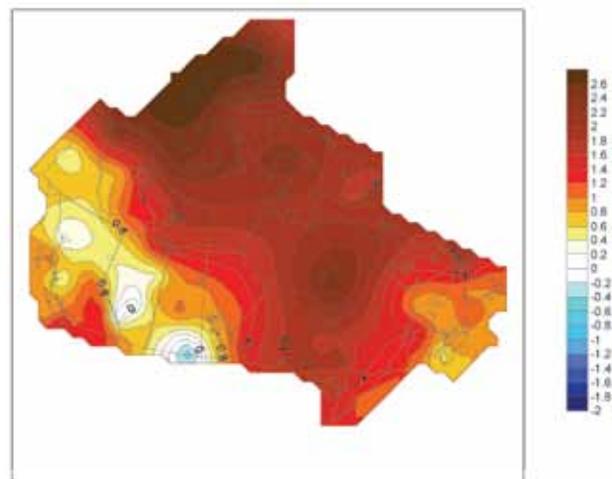
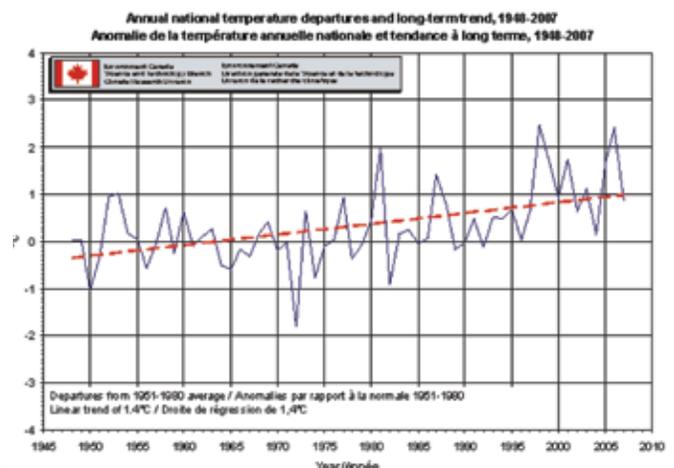


Figure 12. Ci-dessus : Tendence cumulative de la température observée au Canada, de 1976 à 2006. Ci-dessous : Écarts par rapport aux températures nationales annuelles et à la moyenne à long terme (1951-1980).

Source : Bob Whitewood, Division de la recherche sur le climat, Environnement Canada



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 chlorofluorocarbones (CFC), les principaux agents de l'appauvrissement de l'ozone, sont aussi de puissants gaz à effet de serre, leur potentiel de réchauffement étant jusqu'à 10 000 fois plus grand que celui du dioxyde de carbone. En outre, l'ozone lui-même a un effet considérable sur la distribution de la chaleur sur Terre. Non seulement il ajoute de la chaleur à la stratosphère en absorbant le rayonnement ultraviolet du Soleil, mais il absorbe aussi le rayonnement de grande longueur d'onde émanant de la surface de la Terre.

Les liens

L'état de l'atmosphère à un instant donné est le résultat d'un rééquilibrage constant d'un grand nombre de processus. En perturbant certains d'entre eux, les substances destructrices de l'ozone et les gaz à effet de serre déclenchent des rajustements qui affectent d'autres éléments de l'équilibre. Et il est démontré que certains de ces rajustements ont un impact notable 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 deux molécules d'oxygène afin de produire deux molécules d'eau plus du dioxyde de carbone. Toutefois, la plupart de l'eau qui se retrouve dans la stratosphère est transportée verticalement à travers la couche tropicale de la tropopause, par la circulation Brewer-Dobson. De nombreuses études ont signalé une augmentation de la teneur en vapeur d'eau à diverses périodes. Cette augmentation peut être attribuée à une augmentation de la teneur en méthane ou à un renforcement de la circulation Brewer-Dobson. S'il y a davantage de vapeur d'eau dans la stratosphère, il pourrait se former davantage de nuages stratosphériques polaires (NSP) (quand la température est inférieure à $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$) et l'appauvrissement de l'ozone s'accroîtrait.

Les pertes d'ozone dans la basse stratosphère ont entraîné un refroidissement de celle-ci, puisqu'il y a moins d'ozone pour absorber l'énergie émise par le Soleil dans le spectre des ondes courtes et le rayonnement de grande longueur d'onde émis par la Terre. On a montré que ce refroidissement de la stratosphère dû à l'appauvrissement de l'ozone compense, bien qu'en partie seulement, le réchauffement direct causé par l'apport

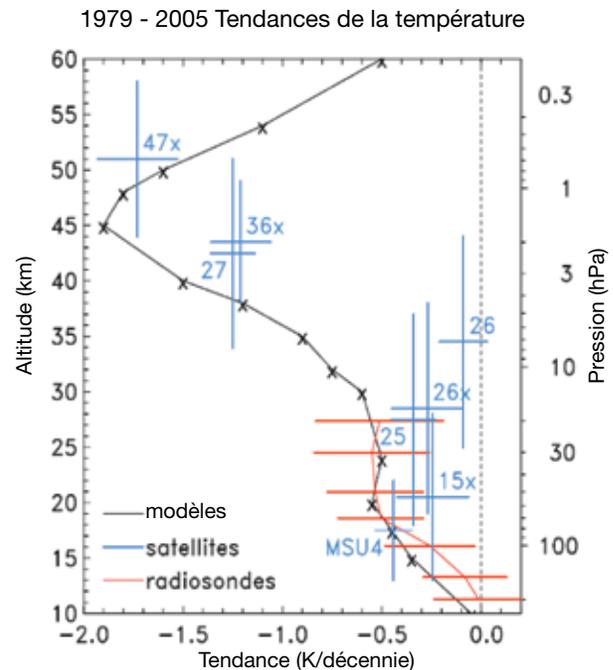


Figure 13. Profil vertical des tendances de la température issues de données de modèles, de satellites et de radiosondes, sur la bande de 60° N à 60° S pour la période de 1979 à 2005. Source : Organisation météorologique mondiale, 2007

de CFC, un gaz à effet de serre, dans la troposphère. Comme le montre la figure 13, on a observé, grâce aux satellites et aux radiosondes, de 1979 à 2005 que la basse stratosphère s'était refroidie de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ par décennie. Dans la haute stratosphère, le refroidissement a été plus marqué, soit de 1 à $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ par décennie. Les études indiquent également que l'appauvrissement de l'ozone a conduit à un refroidissement moins prononcé du vortex polaire arctique, qui atteint son maximum au printemps. Les modèles scientifiques laissent entendre que seule une partie du refroidissement observé du vortex arctique peut être attribué à l'appauvrissement de l'ozone.

L'autre importante cause de ce refroidissement de la stratosphère est l'augmentation de la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, qui a pour effet d'accroître le taux d'émission vers l'espace du rayonnement de grande longueur d'onde. Avec l'accumulation du dioxyde de carbone, une quantité d'énergie plus importante que la normale est émise dans l'espace depuis le haut de la stratosphère comparé au bas de la stratosphère, conduisant ainsi à un refroidissement global (figure 14).

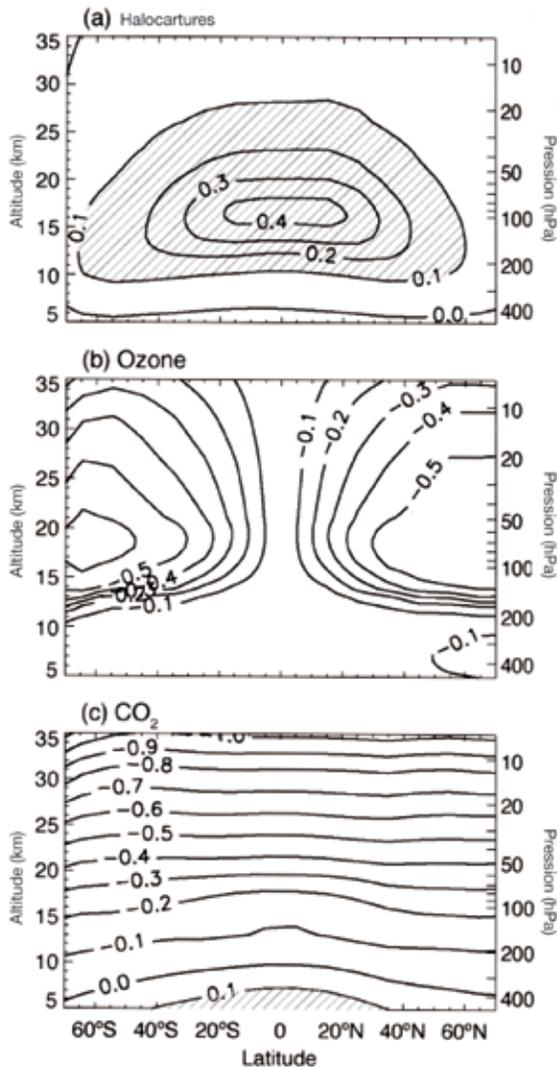


Figure 14. Changement de la moyenne annuelle de la température (K) pour (a) le changement total observé des halocarbures depuis environ 1950, (b) le changement de l'ozone stratosphérique de 1979 à 1997 et (c) le changement du dioxyde de carbone de 1980 à 2000.

Source : McFarlane, 2008

Il a été établi que le refroidissement de la stratosphère aux latitudes moyennes ralentit les réactions chimiques et, par conséquent, l'appauvrissement de l'ozone. Cependant, au-dessus des régions polaires, le refroidissement de la stratosphère polaire a accru la probabilité et la fréquence de formation des NSP, entraînant un appauvrissement accru de l'ozone polaire au printemps. Or, étant donné qu'à la fin du printemps cet air appauvri en ozone migre des régions polaires à mesure que la circulation des vents polaires diminue, la concentration d'ozone aux latitudes moyennes s'en trouve réduite.

La dynamique de l'atmosphère joue un rôle important pour ce qui est de comprendre et de décrire fidèlement l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique. Elle a en effet, sur la distribution et l'abondance d'ozone stratosphérique, des répercussions directes, par le transport de l'ozone même, et indirectes, par l'action de la température et du transport d'autres espèces chimiques sur la chimie de l'ozone. En raison de la diminution de la quantité de substances appauvrissant la couche d'ozone dans l'atmosphère et des répercussions prévues des changements climatiques, les chercheurs doivent établir quand s'amorcera le rétablissement et déterminer les états futurs probables de la couche d'ozone.

Modèles informatiques

Les modèles chimie-climat sont devenus des instruments utiles, en ce qu'ils fournissent une représentation cohérente des aspects dynamiques du climat et de leur relation à la chimie de l'ozone. Un nouveau domaine de recherche par modélisation vise à quantifier les effets combinés en évaluant les répercussions de l'appauvrissement et du rétablissement de l'ozone stratosphérique sur le climat de la troposphère, et à comprendre les répercussions des changements climatiques sur l'évolution de l'ozone même. Il s'ensuit qu'il faut comprendre la sensibilité à long terme du système climatique aux changements du bilan radiatif associés aux activités humaines et aux phénomènes naturels, comme les éruptions volcaniques et la variabilité de l'activité solaire, la composition et l'évolution de l'atmosphère et, en fin de compte, les effets de ces phénomènes sur le signal des changements climatiques dans toute l'atmosphère active et en surface.

On peut étudier les interactions entre le réchauffement attribuable aux gaz à effet de serre et l'appauvrissement de l'ozone à l'aide de modèles du système climatique planétaire qui intègrent non seulement les effets de réchauffement de ces gaz, mais aussi les réactions qui régissent la composition chimique de l'atmosphère. Ces dernières années, les scientifiques ont utilisé des estimations produites par des modèles du climat très élaborés (modèles de circulation générale couplés atmosphère-océan et modèles chimie-climat avec interaction de l'ozone) afin de prévoir l'évolution globale de la stratosphère. Tous les modèles indiquent un refroidissement de la stratosphère moyenne planétaire, semblable à ce que l'on observe actuellement. L'ampleur du refroidissement varie selon le modèle et le scénario global mais, de l'avis général, le refroidissement de la

stratosphère moyenne planétaire se produit à raison de 0,5 K par décennie dans la basse stratosphère et 2,0 K par décennie dans la haute stratosphère. Il est plus difficile de faire des prévisions quant au taux de refroidissement dans les régions polaires en raison de la grande variabilité de l'atmosphère arctique.

Les simulations de modèles de la stratosphère arctique indiquent qu'il n'y aura pas d'importantes diminutions des concentrations d'ozone dans l'atmosphère arctique au cours des années à venir, mais qu'au contraire on observera une légère amélioration. En fait, cette situation dépend en grande partie des températures dans la stratosphère arctique; ainsi, d'importants épisodes d'appauvrissement de l'ozone surviendraient les années de grand froid, comme cela s'est produit en 2000 et en 2005. Mais les simulations des modèles montrent que la stratosphère arctique se réchauffe et présente une plus grande variabilité, et que l'augmentation de la concentration d'ozone s'explique en grande partie par les changements de la circulation des vents plutôt que par une diminution de la quantité de chlore ou de brome dans l'atmosphère.

Le modèle canadien de l'atmosphère moyenne donne des résultats similaires à ceux des autres principaux modèles chimie-climat fiables. On a ainsi recréé, grâce à ce modèle (voir la figure 15), la baisse de la quantité totale d'ozone de presque tout le globe (de 60° S à 60° N) qui était observée à mesure qu'augmentait la quantité d'halogènes dans l'atmosphère, et on a pu prévoir un rétablissement, suivant la diminution attendue des concentrations futures de ces halogènes. Le modèle laisse aussi prévoir une accentuation de la circulation Brewer-Dobson dans la stratosphère, ce qui pourrait entraîner un « super-rétablissement » jusqu'à des concentrations supérieures d'environ 4 % par rapport aux valeurs d'avant les années 1980, étant donné que plus d'ozone serait transporté des tropiques vers l'Arctique. Le modèle indique qu'avec cette circulation accrue, il se produirait un réchauffement de la stratosphère arctique induit par la dynamique qui pourrait limiter les conditions météorologiques propices à un grave appauvrissement de l'ozone.

Les simulations qui incluent les rétroactions du climat indiquent que la couche d'ozone au-dessus des latitudes moyennes reviendrait au niveau d'avant 1980 avant que ne survienne un rétablissement semblable dans les régions polaires. Les basses températures printanières et la grande quantité de SACO présentes dans l'atmosphère antarctique entraîneront des réapparitions du trou

d'ozone jusqu'en 2065 environ. Les simulations indiquent que de graves épisodes d'appauvrissement de l'ozone sont susceptibles de survenir jusqu'au milieu du siècle au-dessus de l'Arctique. Les modèles suggèrent aussi que les interactions entre l'appauvrissement de l'ozone et les changements climatiques n'ont pas causé d'importants retards dans le rétablissement de l'ozone. Cependant, on ne peut pas assumer que ces interactions sont linéaires ni qu'elles se poursuivront au rythme actuel. Certaines observations de l'Arctique indiquent que les changements climatiques sont présentement plus rapides que ne le prévoient les modèles. On doit donc s'attendre à de profonds changements des systèmes climatiques de la troposphère et de la stratosphère, les interactions et les impacts sur l'environnement et sur la santé humaine demeurant inconnus.

Ainsi que l'a signalé le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat en 2007, les modèles climatiques laissent supposer que la température moyenne à la surface de la Terre pourrait monter de 1,5 à 4 °C. L'ampleur de l'augmentation dépend du scénario envisagé pour la hausse des émissions de gaz à effet de serre au cours du siècle. Cependant, à mesure que la couche d'ozone se rétablira grâce aux mesures prises aux termes du Protocole de Montréal, la stratosphère polaire se réchauffera en raison de la concentration plus élevée d'ozone, la fréquence des nuages stratosphériques polaires diminuera et la force des vents de l'ouest du vortex diminuera au printemps et en été. En d'autres termes, les modifications de la troposphère dues à l'appauvrissement de l'ozone s'annuleront et on constatera pleinement les effets attribuables aux changements climatiques.



Icebergs arctiques.

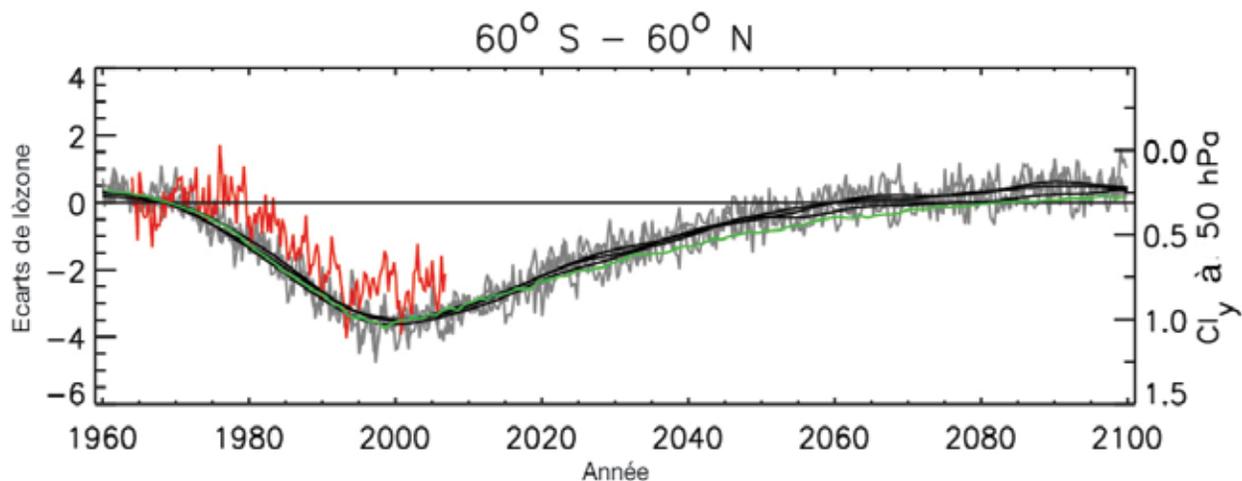


Figure 15. Les lignes grises montrent les changements de l’ozone total quasi-mondial projeté par trois simulations du modèle canadien de l’atmosphère moyenne (MCAM) pour la période de 1960 à 2100, par rapport aux moyennes de 1960 à 1975. Les lignes noires sont des versions lissées des lignes grises, et la ligne verte montre les changements projetés du chlore organique dans la basse stratosphère. La ligne rouge indique les changements de l’ozone observés de 1964 à nos jours, par rapport à la moyenne de 1964 à 1975. D’après le MCAM, l’ozone total quasi-mondial suit de près la charge de chlore, et on constate que, d’ici 2060, il devrait revenir aux niveaux de la période 1960-1975.

Source : Shepherd, 2008



*Nuages stratosphériques polaires
au-dessus de la Suède*

Recherches et observations : l'état de la couche d'ozone de l'Arctique

Observation et surveillance

Les scientifiques sont engagés dans les recherches sur l'ozone stratosphérique depuis la fin des années 1920; mais ce n'est qu'en 1957 que le Canada a établi, à titre de contribution à l'Année géophysique internationale, un réseau permanent de collecte de données sur l'ozone stratosphérique. À ce moment-là, on espérait que ce réseau de recherche mène à une amélioration des prévisions météorologiques. Des stations de surveillance utilisant des spectrophotomètres d'ozone Dobson ont donc été installées, entre 1957 et 1964, à cinq endroits : Edmonton (1957), Resolute Bay (1957), Toronto (1960), Goose Bay (1962) et Churchill (1964). Le spectrophotomètre d'ozone Dobson, conçu dans les années 20 par G.M.B. Dobson, chercheur britannique et pionnier des recherches sur l'ozone, a été utilisé pour ces mesures jusqu'en 1988; il a ensuite été remplacé par le spectrophotomètre d'ozone Brewer, un instrument automatisé développé par des scientifiques d'Environnement Canada (T. McElroy, J. Kerr et D. Wardle).



Spectrophotomètres Brewer sur le toit de l'immeuble d'Environnement Canada à Toronto.

L'actuel réseau d'observation canadien se compose de dix stations, dont trois sont situées dans l'Arctique (figure 16). Trois autres stations, à Halifax, Montréal et Winnipeg, ont été en fonction du début des années 1990 jusqu'en 2006.



Figure 16. Le réseau canadien d'observation de l'ozone se compose de 10 spectrophotomètres Brewer situés dans le sud du Canada : Goose Bay, Labrador; Toronto; Churchill, Manitoba; Regina; Saskatoon et Edmonton, et sur l'île Saturna en Colombie-Britannique. Dans l'Arctique, les appareils Brewer sont situés à Resolute Bay, Eureka et Alert, au Nunavut.

À toutes ces stations, des spectrophotomètres Brewer installés au sol mesurent l'ozone. Les instruments sont programmés pour prendre des mesures de l'ozone total, en analysant la lumière du Soleil ou de la Lune, et pour effectuer des balayages spectraux de l'éclairement énergétique ultraviolet horizontal. Depuis les années 1980, les données recueillies à ces stations sont utilisées pour étalonner les mesures satellitaires.

En plus des observations sur l'ozone faites au sol à l'aide des spectrophotomètres Brewer, quelque 300 ozonsondes, des nacelles instrumentées emportées en altitude par des ballons (voir la figure 17), sont lancées par Environnement Canada tout au long de l'année à partir d'Edmonton, de Churchill, de Goose Bay et des trois stations de l'Arctique pour fournir des mesures directes des concentrations d'ozone jusqu'à 35 km d'altitude. Les ozonsondes sont lancées à partir d'Edmonton,

Churchill et Goose Bay depuis 1970 environ et de Resolute Bay, Alert et Eureka depuis 1966, 1987 et 1992, respectivement.



Figure 17. Les ozonosondes canadiennes, comme celle montrée à gauche, sont lancées à partir d'Edmonton, Churchill, Goose Bay, Resolute Bay, Eureka et Alert; elles fournissent des mesures de l'ozone à des altitudes qui peuvent atteindre 35 km.
Source : Janice Lang, RDDC

Depuis 1991, le Canada participe au programme d'ozonosondage Match, qui coordonne le lancement d'ozonosondes dans l'hémisphère Nord, pour analyser la même masse d'air en différents points de son déplacement autour du vortex polaire. Pendant une phase donnée du programme Match, entre 300 et 600 ozonosondes sont lâchées à partir de 30 stations de l'hémisphère Nord, dont six sont situées au Canada. De plus, on recueille des données satellitaires. 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 transporté par d'autres moyens, tels que la circulation atmosphérique. Entre autres, les données du programme Match ont clairement révélé le rôle crucial

de la lumière solaire dans la destruction de l'ozone en plus de montrer le rôle des nuages stratosphériques polaires et des particules de glace dans les épisodes graves d'appauvrissement de l'ozone. Les particules de glace absorbent et, par conséquent, retirent les composés d'azote des composés de fond stables (comme le ClONO_2 , le BrONO_2 et le HCl) pour libérer des atomes de chlore et de brome et les exposer à la lumière du Soleil, ce qui a pour effet d'accroître les pertes d'ozone lorsque l'hiver est particulièrement froid dans l'Arctique.

Des chercheurs canadiens issus des universités et des gouvernements travaillent de concert à la détection des changements chimiques de l'ozone dans la stratosphère en utilisant de très grands ballons de recherche. Ces ballons (voir la figure 18) ont été lancés de Vanscoy, en Saskatchewan, pour étudier la stratosphère. Ils transportaient une nacelle contenant des instruments qui, une fois atteinte l'altitude de 35 km, était relâchée pour redescendre soutenue par des parachutes.



Figure 18. De la hauteur d'un immeuble de 10 étages, le ballon de recherche Mantra transporte jusqu'à une altitude de 35 km des instruments placés dans une nacelle.

Analyse des observations

La figure 19 illustre la tendance à la baisse de la teneur totale en ozone de la basse stratosphère au-dessus de l'Arctique, amorcée au début des années 1980. On a observé de graves épisodes d'appauvrissement de l'ozone en 1996, 1997, 2000, 2003 et 2005. Ces années-là, la stratosphère arctique était assez froide pour que se forment des nuages stratosphériques polaires, et ces épisodes de froid se sont prolongés suffisamment pour entraîner un important appauvrissement de l'ozone au printemps.

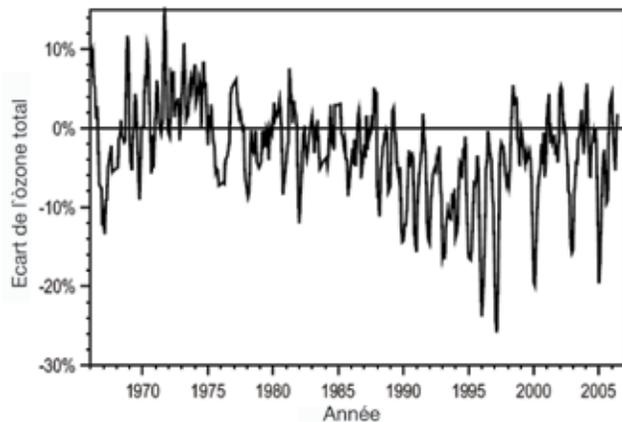


Figure 19. Écart de l'ozone total, en pourcentage, par rapport à la moyenne de la période 1966-1987, calculé à partir des données d'ozonosondages de Resolute Bay, Eureka et Alert, au Nunavut.

Source : Fioletov, 2008

Les données sur l'ozone enregistrées pendant quatre ans à Resolute Bay (voir les figures 22a à 22d) fournissent une illustration particulièrement frappante des tendances saisonnières et annuelles de la couche d'ozone de l'Arctique durant les années froides. Les figures montrent les fluctuations saisonnières (ligne pointillée au centre) de l'abondance de l'ozone avec, habituellement, des pics de février à avril et des minimums en août et septembre. Pour chacune des quatre années illustrées, on note cependant un grave appauvrissement de l'ozone au-dessus de l'Arctique; les graphiques tracés à partir des données de Resolute Bay montrent un écart considérable par rapport aux concentrations normales enregistrées au printemps. Plus particulièrement, au printemps 1997, on a observé des valeurs sous les 240 dobsons, ce qui est bien inférieur au minimum moyen de 380 dobsons enregistré au cours d'un printemps normal. Pour les années où la stratosphère au-dessus de l'Arctique est chaude, les observations montrent que le degré d'appauvrissement de l'ozone est semblable à ce qui est enregistré ailleurs au Canada, soit de 5 à 10 % sous les valeurs normales au printemps.

Recherches sur l'ozone dans l'Arctique

Les recherches sur l'ozone de l'Arctique ont reçu un nouvel élan en 1992 avec l'ouverture de l'Observatoire de l'ozone stratosphérique arctique, sur l'île d'Ellesmere (figure 20). En 2006, l'observatoire a pris le nom de Polar Environment Atmospheric Research Laboratory (PEARL) après être passé sous la direction du Réseau canadien pour la détection des changements atmosphériques (RCDCA), un consortium d'universités canadiennes dirigé par J. Drummond, de la Dalhousie University. Les recherches scientifiques effectuées à l'observatoire PEARL incluent la collecte de mesures détaillées de la qualité de l'air, de la concentration de l'ozone stratosphérique et des changements climatiques dans l'atmosphère de l'Arctique. Depuis 2004, l'observatoire PEARL est aussi le site d'un programme qui a pour objet de prendre des mesures pour valider les données recueillies par un satellite canadien.

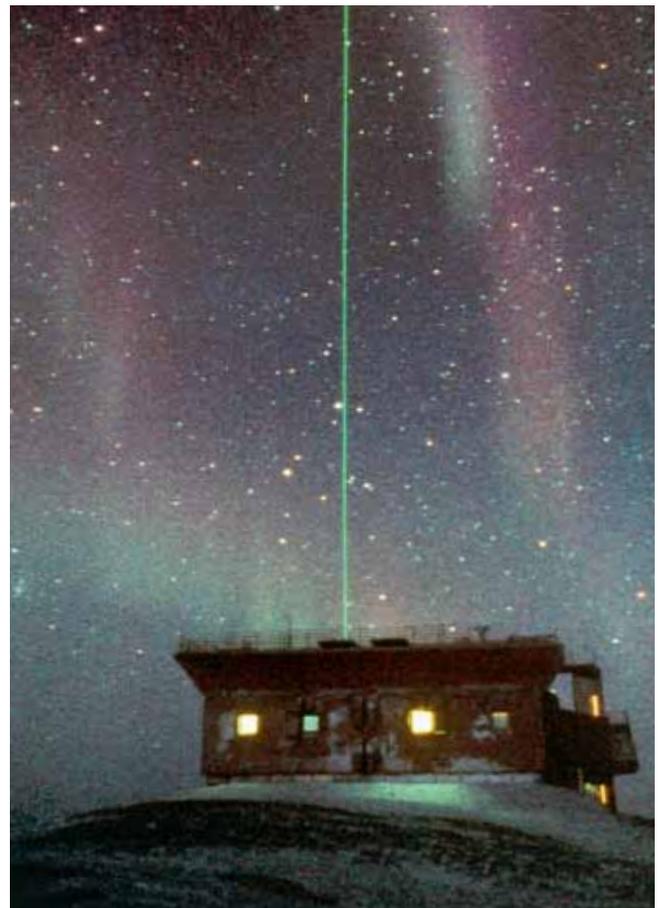


Figure 20. Le Polar Environment Atmospheric Research Laboratory d'Eureka, sur l'île d'Ellesmere, dans l'extrême-Arctique canadien. Le faisceau sortant du toit est celui du laser Lidar.

L'Agence spatiale canadienne a financé le développement d'un satellite, appelé SCISAT, utilisé pour l'expérience sur la chimie atmosphérique (ACE) (voir la figure 21) dont l'objectif est de faire des relevés atmosphériques en



Figure 21. Le satellite de l'Expérience sur la chimie atmosphérique, aussi appelé SCISAT.

ce qui concerne l'appauvrissement de l'ozone, tout particulièrement dans la stratosphère de l'Arctique en hiver et au printemps. Le satellite a été lancé le 12 août 2003; actuellement, il prend des mesures d'occultation à l'aide d'un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) et d'un spectromètre à réseau de diodes mis au point par Environnement Canada. Les données ainsi obtenues ont donné des profils de concentrations pour plus de 10 gaz à l'état de traces, en plus d'apporter des renseignements sur les caractéristiques et l'occurrence des nuages stratosphériques polaires. L'équipe qui pilote cette mission comprend des chercheurs du Canada, de Belgique, de France et des États-Unis.

Du début de décembre jusqu'à mars, à l'observatoire PEARL, on utilise un lidar, un appareil de détection et télémétrie par ondes lumineuses, pour obtenir des profils verticaux de l'ozone et de la température. Le lidar, qui mesure la réflexion d'impulsions laser comme un radar mesure celle d'ondes radio, peut aussi servir pour déterminer les concentrations atmosphériques des fines

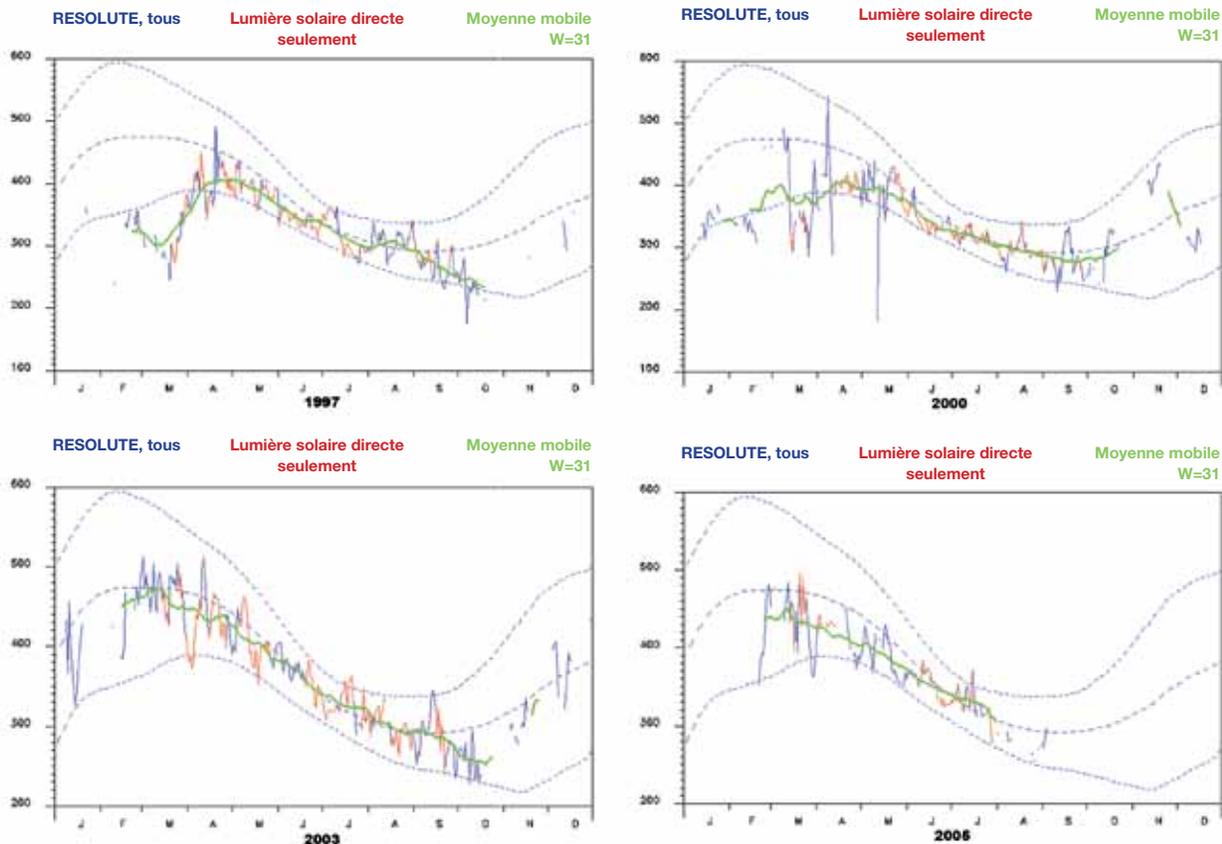


Figure 22. Ozone total au-dessus de Resolute Bay en (a) 1997, (b) 2000, (c) 2003 et (d) 2005, printemps où la stratosphère de l'Arctique a été très froide et où on a observé un grave appauvrissement de l'ozone. La ligne tiretée du centre indique les valeurs moyennes de l'ozone; les lignes inférieure et supérieure les valeurs maximale et minimale moyennes, respectivement. Après un grave appauvrissement au printemps, la couche d'ozone s'est rétablie chaque année, revenant à des valeurs proches de la moyenne à long terme ou légèrement inférieures.

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 du sud jusque dans l'Arctique). Comme le lidar a un meilleur rendement dans l'obscurité totale, on l'éteint lorsque l'été arctique approche et que les nuits raccourcissent. La superposition de mesures obtenues grâce au satellite et au lidar permet non seulement de vérifier la précision des quantités d'ozone total mesurées, mais également de détecter les températures atmosphériques et les régimes de dispersion de la lumière qui indiquent la présence de nuages stratosphériques polaires, comme on peut le voir à la figure 23.



Figure 23. Nuages stratosphériques polaires au-dessus de la Suède, en 2000.

Source : NASA

Les scientifiques de l'observatoire PEARL utilisent aussi un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) pour mesurer la composition chimique de la stratosphère. Parmi les substances chimiques analysées à l'aide de l'IRTF, une des plus importantes 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. 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 qu'anthropiques. Ainsi qu'on l'a mentionné précédemment, les scientifiques des universités et des gouvernements ont mis au point, au cours des dix dernières années, le modèle canadien de l'atmosphère moyenne afin de générer des représentations des processus chimiques et physiques en jeu dans la stratosphère plus détaillées que ce qui était possible auparavant. Le modèle figurait dans la plus récente comparaison de modèles, effectuée par l'Organisation météorologique mondiale, dont l'objectif est d'évaluer la capacité actuelle des modèles climatiques globaux de l'atmosphère moyenne à décrire l'état actuel et futur de la stratosphère, l'abondance de chlore et les répercussions des gaz à effet de serre.

Protection de la couche d'ozone

En tant que Partie à la Convention de Vienne pour la protection de la couche d'ozone de 1985 et au Protocole de Montréal de 1987, 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. Les pays signataires du Protocole de Montréal savent qu'il est important de disposer d'observations à long terme systématiques et de centres de données de grande qualité pour les activités de recherche et de surveillance. Depuis 1961, Environnement Canada exploite, à Toronto, 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. Actuellement, les archives de données du Centre contiennent une vaste gamme de produits informatiques sur l'ozone et le rayonnement ultraviolet. Le Centre accepte les données sur l'ozone en temps quasi-réel et affiche des cartes à jour de la colonne d'ozone, dressées à partir des données produites par les instruments au sol ou embarqués sur des satellites. Des cartes quotidiennes des hémisphères et du monde sont disponibles pour toutes les périodes des 40 dernières années. Les analyses produites par le centre de données alimentent les processus nationaux et internationaux d'évaluation de l'ozone et s'inscrivent dans la préparation du *Bulletin sur l'ozone* de l'Organisation météorologique mondiale. Des graphiques de séries chronologiques sont aussi tracés à partir des données archivées. Le site Web du Centre (http://www.woudc.org/index_f.html) contient des données recueillies à plus de 400 stations réparties sur toute la planète (voir la figure 24).

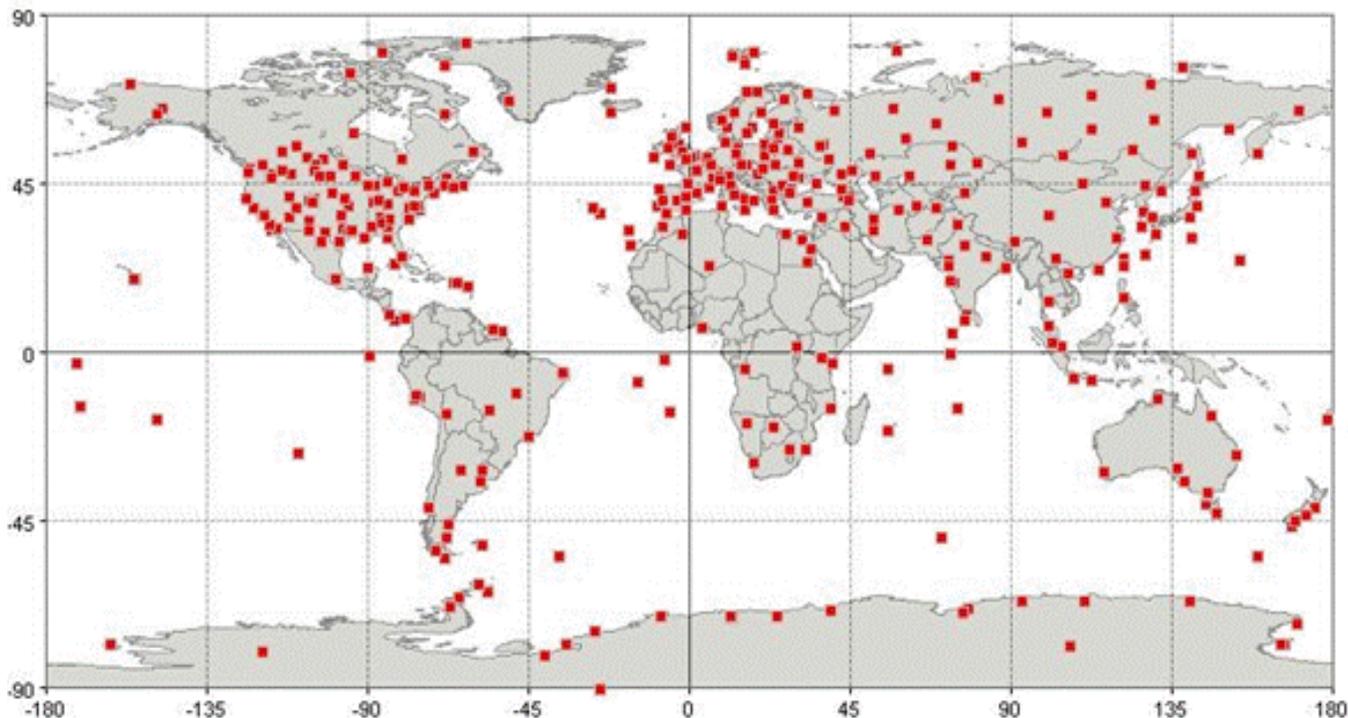


Figure 24. Emplacement des instruments Brewer et Dobson fournissant les données sur l’ozone total au Centre mondial de données sur l’ozone et le rayonnement ultraviolet (WOUDC) à Toronto. Le site Web du Centre (www.woudc.org/index_f.html?) contient des données provenant de plus de 400 stations réparties sur la planète.

Depuis la fin des années 1970, le Canada est à l’avant-garde de la recherche sur les mesures visant à protéger la couche d’ozone. Reconnu pour le rôle important qu’il a joué dans l’établissement du Protocole de Montréal en 1987, il est demeuré un chef de file mondial dans le domaine, en étant l’hôte de réunions à l’occasion des dixième et vingtième anniversaires du Protocole de Montréal (1997 et 2007). Lors du 10^e anniversaire, les scientifiques canadiens ont présenté la première évaluation canadienne sur la couche d’ozone, intitulée *La science de l’ozone : perspective canadienne sur la couche d’ozone*, document qui a été distribué aux délégués à la conférence sur le Protocole de Montréal, en septembre 1997.

Lors du 20^e anniversaire, en septembre 2007, on a publié une brochure contenant des articles sur l’historique de l’appauvrissement de l’ozone, un aperçu de la science de l’ozone au Canada, et les résultats de l’évaluation de 2007 de la science de l’ozone au Canada. Cette évaluation, qui comportait divers articles rédigés par d’éminents scientifiques canadiens, du gouvernement et du milieu universitaire, spécialisés dans le domaine

de l’ozone et du rayonnement ultraviolet, est parue dans un numéro spécial de la revue *Atmosphere-Ocean*, en mars 2008. Ces documents sont disponibles sur Internet (www.msc-smc.ec.gc.ca/saib/ozone/ozone_f.html).



Le Polar Environment Atmospheric Research Laboratory dans les montagnes surplombant Eureka, au Nunavut.

Pour que le rétablissement de l'ozone se concrétise, le Canada a continué à élaborer des politiques efficaces, fondées sur une meilleure compréhension des processus d'appauvrissement de l'ozone. En examinant la science acquise, il est évident que des incertitudes demeurent, notamment en ce qui concerne l'Arctique, où on observe encore un grave appauvrissement de l'ozone. Ces appauvrissements peuvent influencer sur les niveaux d'ozone au printemps et à l'été dans le sud du Canada. Le Canada maintient un programme de surveillance pour suivre ces changements et déterminer leurs effets sur la population canadienne. Ce programme contribue également aux mesures mondiales mises en place pour surveiller l'évolution à long terme de la couche d'ozone. Le Canada continue de renforcer sa compréhension de la science de l'ozone dans l'Arctique en maintenant son réseau de stations de surveillance de l'ozone ainsi que son réseau d'ozonosondage et en améliorant les modèles informatiques visant à simuler la chimie de l'appauvrissement de l'ozone et les processus dynamiques et radiatifs. De nombreuses lacunes dans les connaissances actuelles devraient être comblées grâce au programme canadien couronné de succès de satellites scientifiques.



*Clair de lune sur le Polar Environment
Atmospheric Research Laboratory
d'Eureka, au Nunavut*

L'avenir de la couche d'ozone de l'Arctique

La concentration globale des substances appauvrissant la couche d'ozone dans la troposphère a diminué de 8 à 9 % par rapport au sommet enregistré du milieu des années 1990 jusqu'en 2006 (voir la figure 25). Cette diminution est en bonne partie attribuable aux gaz de courte durée de vie, comme le méthylchloroforme, qui demeurent dans l'atmosphère moins d'un an avant d'être éliminés. Les réductions futures des concentrations de composés de chlore et de brome se feront donc plus lentement puisqu'elles exigent la dissociation et l'élimination des gaz de longue durée de vie. Comme on peut le voir à la figure 26, les gaz les plus importants dans ce groupe sont les chlorofluorocarbones 11 et 12, qui demeurent dans l'atmosphère respectivement 50 et 100 ans. La concentration de chlorofluorocarbène 12, dont la durée de vie est de 100 ans, s'est stabilisée dans l'atmosphère étant donné que la production mondiale a été en grande partie interrompue depuis le milieu des années 1990. Cette diminution globale des concentrations de SACO dans l'atmosphère montre l'efficacité du Protocole de Montréal et de ses amendements.

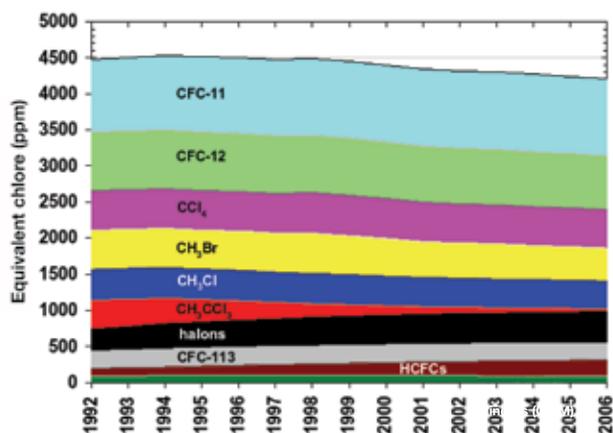


Figure 25. Contribution de tous les gaz chlorés et bromés de longue durée de vie à l'abondance calculée d'équivalent chlore dans l'atmosphère. L'équivalent chlore total a atteint un maximum entre 1992 et 1998, après quoi il a baissé. Cette baisse a été attribuée à l'impact des mesures prises aux termes du Protocole de Montréal.

Source : Earth System Research Laboratory (www.esrl.noaa.gov)

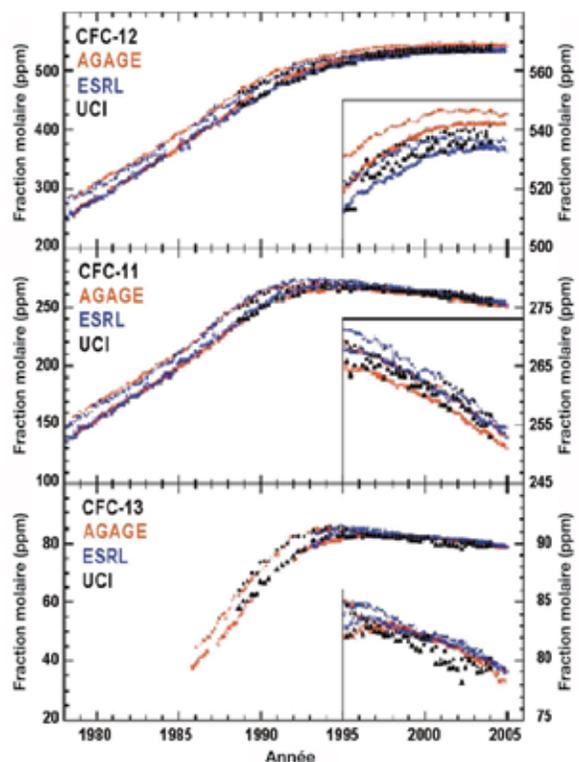


Figure 26. Concentrations de chlorofluorocarbones dans la troposphère, observées à divers endroits de la planète. Les chlorofluorocarbones sont très stables dans la troposphère et ne se dissocient que quand ils sont exposés au rayonnement ultraviolet intense dans la haute stratosphère. Le chlore qu'ils contiennent finit par retourner dans la troposphère, où il est éliminé, mais le processus prend environ 50 ans pour le chlorofluorocarbène 11 et environ 100 ans pour le chlorofluorocarbène 12.

Source : Organisation météorologique mondiale, 2007

Les concentrations de SACO sont constantes dans la troposphère et ne diminuent que dans la stratosphère, où ces substances sont dissociées par l'intense rayonnement ultraviolet. Étant donné que les substances appauvrissant l'ozone prennent jusqu'à quatre ans pour atteindre la stratosphère et s'y dissocier, la baisse des niveaux stratosphériques de chlore et de brome accusera un retard de quelques années par rapport à la basse atmosphère. Ainsi, la quantité de chlore dans la stratosphère, qui est actuellement de 3,5 parties par

milliard (ppb), a culminé aux alentours de 2000, pour ensuite diminuer environ cinq ans après avoir atteint un sommet dans la troposphère.

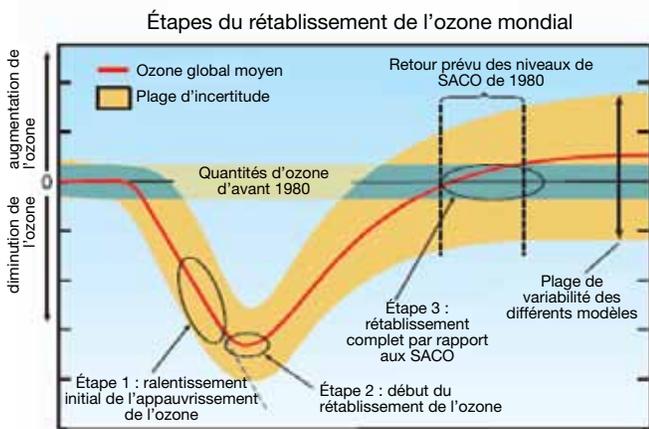


Figure 27. Simulation informatique des étapes du rétablissement de l'ozone mondial. À l'heure actuelle, la couche d'ozone en est à l'étape 2, aux environs du niveau d'appauvrissement maximal. D'ici 10 à 20 ans, l'ozone devrait commencer à redevenir plus abondant. Source : Organisation météorologique mondiale, 2007

La capacité de la couche d'ozone de l'Arctique à se rétablir à son niveau d'avant 1980 dépendra des conditions météorologiques et de la diminution des concentrations de SACO, ce deuxième facteur étant le plus important. Les modèles informatiques indiquent que l'on peut raisonnablement s'attendre à une amélioration substantielle des valeurs de l'ozone aux latitudes moyennes d'ici 2050, à mesure que les concentrations de SACO redescendront aux niveaux d'avant 1980. D'ici 2060 à 2070, les concentrations de ces substances devraient être proches de celles correspondant aux concentrations d'avant 1980, permettant ainsi au niveau de l'ozone de retrouver sa concentration mondiale d'avant 1980, tel qu'illustré à la figure 27. La météorologie de l'atmosphère de l'Arctique jouera aussi un rôle important dans le rétablissement de la couche d'ozone de l'Arctique. Les années durant lesquelles la stratosphère de l'Arctique est très froide, un grave appauvrissement de l'ozone pourrait survenir jusqu'à ce que la concentration des substances appauvrissant l'ozone soit réduite.

La couche d'ozone de l'Arctique sera très vulnérable au cours des 15 prochaines années, tant que les concentrations atmosphériques de substances appauvrissant l'ozone n'auront pas commencé à diminuer par rapport

aux sommets atteints. Pendant cette période, l'Arctique sera particulièrement vulnérable aux hivers très froids, alors que l'augmentation continue des concentrations de gaz à effet de serre entraînera un refroidissement supplémentaire de la stratosphère et une formation plus fréquente de NSP. Le réchauffement de la troposphère et le refroidissement de la stratosphère continueront à modifier la dynamique de la circulation des vents dans l'atmosphère, ce qui influera sur la vitesse du flux polaire dans la stratosphère. Bien que l'appauvrissement de l'ozone au-dessus de l'Arctique soit principalement déterminé par les concentrations de SACO dans l'atmosphère et par les conditions météorologiques, des concentrations plus élevées d'ozone, attribuables à une augmentation naturelle ou anthropique de la circulation Dobson-Brewer influenceront sur les processus chimiques et dynamiques dans l'atmosphère de l'Arctique. 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.

Les efforts mis en œuvre actuellement pour débarrasser l'atmosphère des substances destructrices de l'ozone ont une incidence négative sur les changements climatiques, ce qui, à son tour, pourrait influencer sur l'appauvrissement futur de l'ozone de l'Arctique. Les hydrurochlorurofluorurocarbones et les hydrurofluorurocarbones, les substances les plus couramment utilisées pour remplacer les chlorurofluorurocarbones, sont aussi des gaz à effet de serre, et certains d'entre eux ont un potentiel de réchauffement presque aussi élevé que les CFC. Leur utilisation contribuera donc au réchauffement par effet de serre et au refroidissement de la stratosphère qui l'accompagne. C'est pourquoi les participants aux réunions de 2007 du Protocole de Montréal, ont décidé d'accélérer l'élimination progressive de la production et de l'utilisation des hydrurochlorurofluorurocarbones. Les pays développés achèveront cette élimination progressive en 2020, alors que les pays en développement ont convenu de réduire de 67,5 % la production et l'utilisation de ces composés chimiques d'ici 2025 et de les éliminer complètement d'ici 2030.

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 et autres polluants. Ainsi que nous l'avons décrit précédemment, tous ces problèmes sont liés par diverses interactions physiques et chimiques; il est donc scientifiquement sensé de les traiter dans le cadre d'une approche intégrée et globale.

Pour faire face à tous ces problèmes complexes, la recherche et la surveillance demeureront des outils de soutien importants pour l'élaboration de politiques. Il faudra continuer à surveiller et à analyser les quantités d'ozone stratosphérique et le rayonnement ultraviolet, ainsi que les SACO et les 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 et de la dynamique atmosphériques seront aussi essentielles si les scientifiques veulent réduire les lacunes de la compréhension actuelle de l'appauvrissement de l'ozone et améliorer la capacité de prédire le devenir probable de la couche d'ozone.

Liens utiles



Questions d'intérêt général sur l'appauvrissement de l'ozone

Environnement Canada, Section des études expérimentales :
<http://exp-studies.tor.ec.gc.ca/>

Agence spatiale canadienne :
<http://www.asc-csa.gc.ca/fra/satellites/scisat/ozone.asp>

U.S. Climate Prediction Center :
www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere (en anglais seulement)

Arctique

Arctic Climate Impact Assessment :
www.acia.uaf.edu/ (en anglais seulement)

U.S. National Snow and Ice Data Center :
<http://nsidc.org/arcticseaicenews/index.html> (en anglais seulement)

Service canadien des glaces :
<http://ice-glaces.ec.gc.ca>

Antarctique

Ozone Hole Watch :
<http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/index.html> (en anglais seulement)

Site TEMIS (Tropospheric Emission Monitoring Internet Site) :
<http://www.temis.nl/protocols/o3hole/index.php?lang=1>

Bibliographie

Arctic Climate Impact Assessment. 2005. Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press, 1042 p.

Fioletov, V. E. 2008. Ozone Climatology, Trends, and Substances that Control Ozone. *In* La science de l'ozone en 2007 : une perspective canadienne sur l'ozone dans l'atmosphère en changement. *Atmosphere-Ocean*, vol. 46, n° 1, mars 2008.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). 2007. *Bilan 2007 des changements climatiques : rapport de synthèse*. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (dir.)]. GIEC, Genève, Suisse, 104 p.

IPCC/TEAP. 2005. Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System. Cambridge University Press, 88 p.

McFarlane, N. 2008. Connections between Stratospheric Ozone and Climate: Radiative Forcing, Climate Variability, and Change. *In* La science de l'ozone en 2007 : une perspective canadienne sur l'ozone dans l'atmosphère en changement. *Atmosphere-Ocean*, vol. 46, n° 1, mars 2008.

La science de l'ozone en 2007 : une perspective canadienne sur l'ozone dans l'atmosphère en changement. *Atmosphere-Ocean*, vol. 46, n° 1, mars 2008.

Shepherd, T. G. 2008. Dynamics, Stratospheric Ozone and Climate Change. *In* La science de l'ozone en 2007 : une perspective canadienne sur l'ozone dans l'atmosphère en changement. *Atmosphere-Ocean*, vol. 46, n° 1, mars 2008.

Programme des Nations Unies pour l'Environnement. 2006. Environmental Effects of Ozone Depletion and its interactions with climate change: 2006 Assessment. PNUE, Nairobi, Kenya.

Organisation météorologique mondiale (OMM). 2007. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006. Projet mondial de surveillance et de recherche concernant l'ozone, rapport n° 50, Genève, Suisse, 572 p.

Glossaire

Appauvrissement de l'ozone : Disparition d'une certaine quantité de l'ozone stratosphérique due à la présence de substances chimiques anthropiques et à d'autres processus dynamiques.

Changements climatiques : Changements marqués à long terme des régimes météorologiques moyens sur une période suffisamment longue.

Cycle solaire : Cycle undécennal (de 11 ans) des taches de la surface du Soleil, qui entraîne une variation de la quantité d'énergie normalement émise par le Soleil.

Dobson (DU) : Unité standard de mesure de l'épaisseur de la couche d'ozone, déterminée en quantifiant l'absorption du rayonnement solaire par l'ozone dans une colonne d'atmosphère. Un dobson correspond à 0,01 mm d'ozone séparé et purifié dans la colonne d'ozone, dans les conditions normales de température et de pression.

Gaz à effet de serre : Gaz présents dans l'atmosphère qui absorbent et émettent du rayonnement dans la plage de l'infrarouge.

Nuages stratosphériques polaires (NSP) : Nuages de glace présents dans la stratosphère polaire à des températures inférieures à $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Occultation : Analyse de la lumière du soleil ou d'une étoile telle qu'interrompue par l'atmosphère terrestre afin d'obtenir des renseignements sur la composition, la structure et la dynamique de l'atmosphère.

Ozone : Gaz odorant, incolore et toxique, de formule O_3 , allotrope triatomique de l'oxygène.

Pression partielle d'ozone : Pression qu'exercerait l'ozone d'un mélange gazeux, s'il était seul en présence.

Rapport de mélange de l'ozone : Expression de la concentration d'ozone, calculée en déterminant le rapport entre le poids de l'ozone, en microgrammes, et le poids de l'air, en grammes.

Rayonnement ultraviolet : Rayonnement situé à l'extérieur de la plage du violet du spectre électromagnétique, avec des longueurs d'onde de 220 à 400 nm (UVA, 320 à 400 nm; UVB, 280 à 320 nm; UVC, moins de 280 nm).

Stratosphère : Couche de l'atmosphère située entre la limite supérieure de la troposphère (8–18 km) et la limite inférieure de la mésosphère (80 km).

Substances appauvrissant la couche d'ozone (SACO) : Substances chimiques présumées entraîner un appauvrissement de l'ozone stratosphérique (chlorurofluorocarbones, hydrochlorofluorocarbones, halons, méthylbromure).

Troposphère : Couche inférieure, turbulente, de l'atmosphère, où se produit la majeure partie des phénomènes météorologiques.

Notes





Scientifique vérifiant les instruments à Eureka

WWW.ec.gc.ca

Vous pouvez obtenir des renseignements complémentaires auprès de :

Environnement Canada

Informatèque

351, boulevard Saint-Joseph

Place Vincent-Massey, 8^e étage

Gatineau (Québec) K1A 0H3

Téléphone : 1-800-668-6767 (au Canada seulement) ou 819-997-2800

Télécopieur : 819-994-1412

ATS : 819-994-0736

Adresse électronique : enviroinfo@ec.gc.ca

