
Rapport sur l'état de l'environnement

Comprendre l'atmosphère en évolution

**Revue de la science de base
et des implications d'un changement
du climat et d'un appauvrissement
de la couche d'ozone**

Deuxième édition, 1995

Henry Hengeveld

Service de l'environnement atmosphérique
Environnement Canada

This publication is also available in English under the title
Understanding Atmospheric Change.

Rapport sur l'état de l'environnement n° 95-2
Juillet 1995



Imprimé sur du papier recyclé

Publié avec l'autorisation de la ministre de l'Environnement
©Ministre des Travaux publics et des Services gouvernementaux
Canada, 1995
ISBN 0-662-99799-9
ISSN 1180-3177

Données de catalogage avant publication

Hengeveld, Henry, 1947

Comprendre l'atmosphère en évolution : Revue de la science de base et des implications d'un changement du climat et d'un appauvrissement de la couche d'ozone. Deuxième édition, 1995.

(Rapport sur l'état de l'environnement, ISSN 1180-3177 : Rapport EDE n° 95-2)

Available in English: Understanding atmospheric change.

Comprend des références bibliographiques.

ISBN 0-662-99799-9

N° de cat. : EN 1-11/95-2F

1. Climat—Changements—Aspect de l'environnement. 2. Ozone atmosphérique—Réduction—Aspect de l'environnement. 3. Air—Pollution—Aspect de l'environnement. I. Canada. Environnement Canada. II. Titre: Revue de la science de base et des implications d'un changement du climat et d'un appauvrissement de la couche d'ozone. III. Coll. : Rapport sur l'état de l'environnement : Rapport EDE n° 95-2.

QC981.8.C5H4614 1995 551.5'25 C95-980146-4

Avant-propos

Le développement durable est devenu l'une des clefs de voûte et l'un des principaux buts de la politique officielle du Canada. Son objectif fondamental est d'assurer le développement économique et social du pays sans compromettre la qualité de l'environnement et, par là même, le bien-être des générations futures. Le défi consiste à trouver et à adopter un mode de développement économique qui concourt à la qualité de l'environnement. C'est en leur donnant accès à des informations crédibles et objectives que l'on pourra sensibiliser davantage les Canadiens et les Canadiennes à l'environnement et qu'ils pourront prendre des décisions plus éclairées pour, en dernier ressort, assurer la pérennité de notre patrimoine écologique, économique et culturel.

Le Canada, comme de nombreux autres pays, a institué un programme de rapports sur l'état de l'environnement, à l'intention des Canadiens et des Canadiennes qui s'intéressent au milieu dans lequel ils vivent. Ce programme offre divers produits : feuillets d'information, rapports spéciaux, bulletins, indicateurs environnementaux et rapports synoptiques nationaux.

Ces documents sont le fruit d'un partenariat de plus en plus fécond réunissant les gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux, l'entreprise privée, les universités, les organismes non gouvernementaux et les particuliers. Comme les décisions et les activités de tous les échelons de la société influent sur l'environnement, il est indispensable, pour tous ces partenaires, que les renseignements et les évaluations portant sur l'environnement soient divulgués rapidement et soient crédibles.

La collection des rapports sur l'état de l'environnement fournit aux Canadiens et aux Canadiennes des analyses et des interprétations de données à la fois approfondies et objectives, qui révèlent les principales conditions et tendances environnementales. Les explications de ces tendances et des mesures prises pour préserver et mettre en valeur le milieu naturel sont tout aussi importantes.

Pour plus de précisions au sujet des études scientifiques sur lesquelles repose le présent rapport, prière d'écrire à l'adresse suivante :

Service de l'environnement atmosphérique
Environnement Canada
4905, rue Dufferin
Downsview (Ontario) M3H 5T4

Pour tout complément d'information sur les rapports sur l'état de l'environnement, prière d'écrire à l'adresse suivante :

Direction générale de l'état de l'environnement
Environnement Canada
Ottawa (Ontario) K1A 0H3

Résumé

Le présent rapport sur l'état de l'environnement porte sur deux questions environnementales importantes associées au réchauffement atmosphérique mondial et à l'appauvrissement de la couche d'ozone atmosphérique.

Le rapport commence par une évaluation de l'influence naturelle de l'atmosphère sur le climat terrestre et de la réaction du climat dans le passé. La présence naturelle de gaz à effet de serre tels que la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane et l'oxyde nitreux dans l'atmosphère est d'une importance particulière. L'étude des climats anciens montre une forte corrélation entre les variations de température à long terme et la concentration de ces gaz dans l'atmosphère. Avec l'avènement de la révolution industrielle, les concentrations ont augmenté pour atteindre des niveaux sans précédent et elles posent des inquiétudes à la communauté scientifique sur la possibilité d'un changement rapide et dramatique du climat de la planète.

Les modèles numériques des processus climatiques indiquent qu'un doublement des concentrations de dioxyde de carbone de l'ère préindustrielle entraînerait une augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre de 1,5 à 4,5 °C. Un tel réchauffement, associé à des changements inévitables des configurations de précipitations, provoquerait des perturbations sur une grande échelle des écosystèmes naturels et demanderait une adaptation radicale des sociétés humaines et des espèces sauvages.

La deuxième partie du rapport étudie l'appauvrissement possible de la couche protectrice d'ozone de la haute atmosphère. L'émission de produits chimiques industriels d'une durée de vie très longue, tels que les chlorofluorocarbures (CFC), semble accélérer l'appauvrissement de l'ozone atmosphérique. Une réduction nette de la quantité d'ozone total de plusieurs centiles a déjà été observée dans les dernières décennies, notamment des diminutions saisonnières de plus de 50 % au-dessus de l'Antarctique au cours des dernières années. Si la quantité d'ozone continue de diminuer, une augmentation marquée du rayonnement solaire ultraviolet nocif à la surface de la Terre aura des incidences désastreuses sur la santé humaine et animale, la végétation et les matériaux.

Enfin, le rapport considère les liens entre ces deux questions, d'autres problèmes de pollution atmosphérique et le comportement humain; il examine les mesures prises et à prendre en réaction à ces phénomènes, tant au Canada qu'à l'étranger.

Table des matières

Remerciements	9
Introduction	11
<i>Chapitre 1</i>	
Le climat naturel de la Terre	13
Le système climatique naturel de la Terre.....	13
Le moteur thermique de la planète	13
Le rayonnement solaire descendant.....	14
Le rayonnement thermique ascendant.....	15
L'équilibre climatique.....	15
Les climats du passé	16
La reconstitution du climat	16
Le dernier million d'années.....	19
Le dernier millénaire	20
Les climats passés du Canada.....	20
<i>Chapitre 2</i>	
L'amplification de l'effet de serre	25
Le dioxyde de carbone	25
Le méthane	28
Les autres gaz à effet de serre.....	29
Les autres influences humaines.....	30
<i>Chapitre 3</i>	
La prévision du changement climatique	33
Les modèles mathématiques du climat.....	33
Les résultats des expériences avec les modèles.....	35
La Terre se réchauffe-t-elle?	37
<i>Chapitre 4</i>	
Une planète plus chaude	39
Les écosystèmes naturels	39
L'agriculture	39
Les régions côtières	40
Les autres impacts	41
Les implications pour la sécurité de la planète	42

Chapitre 5

Un Canada plus chaud	45
Les forêts.....	45
L'agriculture	46
Les ressources en eau.....	48
La neige et la glace	49
L'inondation des côtes	50
Les autres impacts	51

Chapitre 6

L'appauvrissement de la couche d'ozone	53
La chimie de la couche d'ozone	53
Les changements dans la couche d'ozone.....	54
Les effets de l'appauvrissement de la couche d'ozone.....	57

Chapitre 7

Comment réagissons-nous?	59
Comment faire face aux incertitudes scientifiques?	59
Vers un accord international	60
La réaction à l'échelle planétaire	61
La réaction du Canada	63
Le rôle des citoyens	65
Protéger l'atmosphère : un devoir personnel.....	67
Sources des figures et des tableaux	69
Quelques ouvrages utiles.....	70
Liste des rapports sur l'état de l'environnement	71

Liste des encadrés

Le changement climatique au Canada	22
Les gaz à effet de serre : une comparaison.....	30
Le modèle canadien de circulation générale	34
Le dioxyde de carbone et les plantes	43
Le changement climatique et les phénomènes extrêmes	51
La mesure de la quantité d'ozone.....	56
Le Programme d'action nationale sur le changement climatique	64

Liste des figures

1.	Flux d'énergie dans le système climatique mondial	14
2.	Circulation atmosphérique générale	16
3.	Configurations des courants océaniques	17
4.	Répartition annuelle mondiale des précipitations	17
5.	Principaux éléments influant sur le système climatique mondial	18
6.	Variations des températures moyennes annuelles du dernier million d'années	19
7.	Comparaison des températures locales et des concentrations atmosphériques de méthane et de dioxyde de carbone dans l'Antarctique durant les 220 000 dernières années	20
8.	Effets des variations des concentrations atmosphériques d'aérosols sur la transmission de la lumière	21
9.	Écarts de la température moyenne annuelle mondiale en surface, entre 1860 et 1994, par rapport aux moyennes de 1950–1979	21
10.	Estimation de l'augmentation des températures en Amérique du Nord durant le sommet chaud de l'Holocène, il y a 6 000 ans	23
11.	Conditions dans l'Arctique pendant l'épisode médiéval chaud, il y a 1 000 ans	23
12.	Tendances mondiales et canadiennes des températures de surface depuis 1860	24
13.	Tendances des températures dans deux régions du sud du Canada	24
14.	Variations des concentrations atmosphériques de méthane durant les 1 000 dernières années	25
15.	Le cycle du carbone à l'échelle du globe	26
16.	Teneur en carbone des émissions annuelles mondiales de dioxyde de carbone provenant de la combustion des combustibles fossiles et de la production de ciment, 1860–1991	26
17.	Répartition régionale des émissions de dioxyde de carbone provenant de la combustion des combustibles fossiles, 1950 et 1989	27
18.	Concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone	27
19.	Projections des concentrations futures de dioxyde de carbone dans l'atmosphère	28
20.	Estimation de la contribution de diverses sources aux émissions totales de méthane à l'échelle du globe	29
21.	Principaux éléments d'un modèle de circulation générale	35
22.	Tendances des températures mondiales prévues par les modèles et observées	37
23.	Taux estimatifs de l'élévation du niveau de la mer jusqu'en 2100	40
24.	Effets de l'élévation du niveau de la mer sur les côtes du Bangladesh	41
25.	Modification des limites des forêts et des prairies par suite d'un doublement de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone	46
26.	Nombre moyen d'incendies de forêt et superficie forestière moyenne brûlée par année (par décennie)	46
27.	Augmentation possible de la superficie des terres agricoles par suite du réchauffement climatique planétaire	47
28.	Effets possibles du réchauffement climatique sur l'humidité du sol dans le sud de la Saskatchewan	48
29.	Effets d'une élévation de 1 m du niveau de la mer sur les inondations à Charlottetown	50
30.	Répartition verticale de l'ozone dans l'atmosphère	53
31.	Répartition moyenne mondiale de l'ozone naturel	54

32.	Quantité d’ozone total au-dessus de Halley Bay, Antarctique, 1956–1993	54
33.	Quantité d’ozone total au-dessus des régions septentrionales de l’hémisphère Nord en mars 1986	55
34.	Destruction de l’ozone par des catalyseurs	57
35.	Taux de mortalité par cancer de type mélanome en fonction de la latitude, aux États-Unis	58

Liste des tableaux

1.	Concentration de divers gaz dans l’air sec	14
2.	Résultats des expériences en fonction d’un doublement de la teneur en dioxyde de carbone	36
3.	Fréquence des basses eaux dans les Grands Lacs	49
4.	Durée de la saison de ski en Ontario et au Québec	50

Remerciements

Tout au cours de la longue préparation du rapport original, l'auteur a continuellement profité des idées, des conseils et de l'appui de ses collègues et de l'administration du Service de l'environnement atmosphérique. Les critiques de T. Allsopp, B. Atkinson, J.-P. Blanchet, G. Boer, S. Cohen, R. Daley, K. Dawson, E. Dowdeswell, P. Galbraith, M. Jean, J. Kerr, P. Kertland, H. Mackey, A. Malinauskas, A. Manson, R. Street, G. Vigeant et D. Wardle ont été particulièrement appréciées. Des remerciements spéciaux s'adressent aussi aux critiques, collaborateurs et conseillers de l'extérieur : J. Anderson, J. Doucet, G. McKay, K. Millyard, J. Séguin et W. Simpson-Lewis.

La révision de la deuxième édition du rapport est due à la collaboration et aux conseils pertinents de P. Kertland, L. Kerr, G. Fenech et J. Drexhage.

L'auteur est redevable au rédacteur du rapport, David Francis (Lanark House), qui a transformé un document scientifique en un rapport pouvant être compris par tous et chacun et qui a aussi apporté son aide à la préparation finale des deux versions; à Gilles Tardif pour la révision des deux versions traduites du texte anglais; à Albert Wright pour son aide dans la coordination de la publication; à Image One Productions pour la qualité des graphiques. P. Burke, U. Ellis et N. Khaja ont fait preuve de beaucoup de patience pendant le traitement de texte des nombreuses versions et méritent notre reconnaissance.

Pour terminer, l'auteur tient à exprimer sa gratitude envers le Groupe de recherche et de développement énergétiques pour son aide financière à l'élaboration de ce rapport.

Introduction

À ce que nous savons, notre atmosphère est la seule à pouvoir assurer la vie. Elle apporte l'oxygène, la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone nécessaires au maintien des processus biologiques à l'intérieur de l'écosystème de la surface terrestre. Elle contient en haute altitude une couche d'ozone protectrice qui joue le rôle d'écran contre le rayonnement ultraviolet du Soleil. De plus, ses composants comprennent des gaz qui servent de couverture isolante autour de la planète en maintenant à la surface l'amplitude thermique nécessaire à la présence d'eau liquide et, par conséquent, de vie. Chacun de ces facteurs est essentiel à l'existence des êtres vivants et tous persistent depuis des millions d'années.

Les scientifiques ont reconnu depuis longtemps l'importance de l'atmosphère terrestre. Toutefois, ce n'est pas avant la fin des années 1960 qu'on nous a présenté les premières et bouleversantes images de la Terre vue de l'espace. Ces images montrent une oasis remarquable de bleu et de blanc, dans l'immensité d'un cosmos sans vie, une oasis protégée par une mince et fragile couche de gaz. C'était une façon saisissante de nous rappeler que la Terre peut en effet être unique et irremplaçable. Neil Armstrong, le premier être humain qui, en juillet 1969, a posé le pied sur la Lune, faisait remarquer que, quand on regarde la Terre de cette distance, son atmosphère ne se voit tout simplement pas. Il ajoutait aussi qu'il faudra se rendre à l'évidence et apprendre à conserver cette atmosphère et à l'utiliser judicieusement.

Si la remarque d'Armstrong était appropriée à l'époque, elle l'est encore bien davantage maintenant. Il est de plus en plus clair, scientifiquement parlant, que l'atmosphère terrestre subit des changements majeurs. Ces changements ont à certains égards déjà dépassé les limites des fluctuations atmosphériques naturelles des 100 000 dernières années au moins, et l'on prévoit qu'ils deviendront encore plus importants avec le temps. Ils semblent directement liés non à une certaine force d'évolution externe à l'œuvre sur la planète, mais à une expérience géophysique à l'échelle du globe involontairement mise en route de l'intérieur par l'humanité, une expérience incontrôlée qui pourrait modifier l'écosystème terrestre bien au-delà de ce que la planète a connu au cours de plusieurs centaines de milliers d'années.

Cette expérience est la conséquence de deux facteurs : des progrès technologiques rapides et une explosion démographique sans précédent, qui ont tous deux débuté au

XVIII^e siècle. Les progrès technologiques, avec l'utilisation des nouvelles formes d'énergie et la multiplication de la capacité de production, ont grandement accru l'impact de l'activité humaine sur le milieu, non seulement par une plus grande consommation des ressources mais également par la production de vastes quantités de produits et de sous-produits dommageables à l'environnement. La croissance démographique du globe, d'environ 600 millions d'habitants au début du XVIII^e siècle à plus de 5 milliards aujourd'hui, s'est ajoutée à ces effets avec le résultat que l'activité humaine atteint maintenant un point tel qu'elle peut rivaliser d'influence sur le milieu avec les forces de la nature.

Ces phénomènes s'accompagnent de changements rapides dans l'utilisation des terres, d'une industrialisation croissante et d'un insatiable besoin d'énergie. Certaines conséquences de ces progrès — smog, pollution de l'eau, appauvrissement et contamination du sol — sont déjà malheureusement évidentes à l'échelle locale et régionale et ont fait, dans de nombreux pays, l'objet d'une vigoureuse législation antipollution. Toutefois, les conséquences à l'échelle du globe ont été beaucoup plus insidieuses, car les dommages sont causés par le rejet artificiel dans l'atmosphère de gaz pour la plupart inodores et invisibles, des substances apparemment inoffensives dont les effets ne sont pas immédiatement perceptibles. C'est tout récemment seulement qu'il a été reconnu que les émissions de ces gaz peuvent modifier la composition de l'atmosphère. Étant donné que cette dernière est le système le plus essentiel au maintien de la vie sur la Terre, ces modifications auront inévitablement des incidences majeures sur la biosphère.

Les changements de la composition atmosphérique qui se produisent actuellement soulèvent deux inquiétudes fondamentales. La première a trait à l'appauvrissement progressif de la couche protectrice d'ozone de la stratosphère. L'autre est associée au réchauffement de la surface terrestre et de la troposphère. Ces questions font l'objet du présent rapport, dont le but est de résumer la compréhension scientifique actuelle des processus en action dans ces changements et de leurs conséquences sur l'écosystème de la planète, la communauté internationale et le Canada.

Les chapitres 1 à 4 présentent l'état actuel des connaissances scientifiques sur le réchauffement atmosphérique et le

changement climatique et des effets possibles de ces phénomènes sur la planète. Les données proviennent avant tout du rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat paru en août 1990 et mis à jour en 1992 et 1994. Ces trois documents représentent le plus récent accord général de la communauté scientifique internationale sur le réchauffement du globe et le changement climatique.

Le chapitre 5 examine les nombreuses conséquences possibles d'un climat plus chaud sur le Canada; le chapitre 6 étudie l'appauvrissement de la couche d'ozone; pour conclure, le chapitre 7 considère le lien entre tous ces aspects du changement atmosphérique et examine ce qui peut être fait pour y réagir.

Chapitre 1

Le climat naturel de la Terre

Par les gaz qui la composent, l'atmosphère assure les conditions essentielles à la vie sur la Terre, mais c'est par son climat qu'elle façonne les configurations et établit les limites de l'existence terrestre. Le climat régit le cycle biologique des plantes et des animaux, influe sur leur croissance et leur vitalité et constitue le principal facteur qui détermine leur répartition sur la planète. Presque toutes les formes de vie complexes sont adaptées pour vivre dans une niche climatique précise et assez étroite.

Grâce à la technologie, les êtres humains sont parvenus à étendre leur niche de manière à y inclure presque toutes les parties du globe, quoique même la vie humaine reste étroitement tributaire des facteurs climatiques. Les types de colonisation, les abris, les habitudes vestimentaires, l'agriculture, le transport et même la culture reflètent tous l'influence extrêmement profonde du climat.

Le climat s'évalue à partir des conditions météorologiques moyennes. Donc, le climat d'un lieu représente la moyenne sur un certain nombre d'années des variations quotidiennes de la température, des précipitations, de la nébulosité, des vents et d'autres conditions atmosphériques qui s'y produisent normalement. Mais le climat est davantage que la simple somme de ces valeurs moyennes. Il se définit aussi par la variabilité de chaque élément climatique, comme la température ou les précipitations, et par la fréquence à laquelle se manifestent différents types de conditions atmosphériques. De fait, tout facteur caractéristique du régime météorologique d'un lieu en particulier ressortit à son climat.

Bien que la notion de climat suppose, comme telle, une continuité et une stabilité à long terme de ces configurations, le climat n'en demeure pas moins un phénomène variable. L'ordre du changement peut être faible et relativement court : ici, un hiver anormalement froid; là, un été chaud. Ou, comme dans le cas des grandes époques glaciaires dont l'apparition et la disparition ont pris des milliers d'années, le changement peut se produire à l'échelle de l'immensité géologique.

Ce chapitre est axé sur les changements auxquels on peut s'attendre pendant les quelques décennies et siècles à venir, étant donné que c'est dans ce laps de temps relativement court que les premiers effets majeurs du réchauffement terrestre se feront probablement sentir. Cependant, pour comprendre

comment se manifesteront ces changements, il faut étendre la période considérée et examiner une longue liste de changements climatiques passés. C'est à partir de cette observation qu'il sera possible de mieux comprendre la variabilité naturelle du climat et les processus qui entrent en jeu dans ses fluctuations souvent spectaculaires. Toutefois, il faut auparavant considérer les forces physiques qui régissent le flux d'énergie atmosphérique, car ce sont elles qui, en dernier ressort, déterminent les principales caractéristiques du climat de notre planète.

Le système climatique naturel de la Terre

Le moteur thermique de la planète

Très simplement, on peut considérer le système climatique terrestre comme une gigantesque machine thermique activée par l'énergie émise par le Soleil. À mesure que cette énergie circule, elle réchauffe la Terre et l'air qui l'entoure, mettant ainsi en mouvement les vents atmosphériques, les courants océaniques et les processus d'évaporation et de précipitation du cycle de l'eau. Ces mouvements et processus se traduisent par les conditions météorologiques et, donc, par le climat.

Toute l'énergie qui entre dans le système climatique finit par en sortir pour retourner dans l'espace sous forme de rayonnement infrarouge. Tant que cette énergie repart au même rythme qu'elle arrive, notre moteur thermique atmosphérique reste en équilibre et la température terrestre moyenne demeure constante. Cependant, si le rythme auquel l'énergie pénètre dans le système ou en ressort varie, l'équilibre se rompt et les températures mondiales se modifient jusqu'à ce que le système s'adapte de lui-même et atteigne un nouvel équilibre.

Le flux d'énergie circulant dans le système est régulé par certains gaz de l'atmosphère. Toutefois, aussi surprenant que cela puisse paraître, le rôle des plus importants composants atmosphériques dans ce processus est minime, sinon inexistant. Bien que l'atmosphère soit composée à 99 % d'azote et d'oxygène (tableau 1), ces gaz sont relativement transparents au rayonnement et n'ont guère d'effet sur l'énergie qui les traverse. C'est le reste des gaz de l'atmosphère qui jouent le principal rôle en régulant les flux énergétiques qui régissent

Tableau 1
Concentration de divers gaz dans l'air sec
(pourcentage du volume total)

Azote	78,1	Hélium	0,000 5
Oxygène	20,9	Méthane	0,000 17
Argon	0,9	Hydrogène	0,000 05
Dioxyde de carbone	0,035	Oxyde nitreux	0,000 03
Néon	0,001 8	Ozone	variable

SOURCE : Liou, 1980.

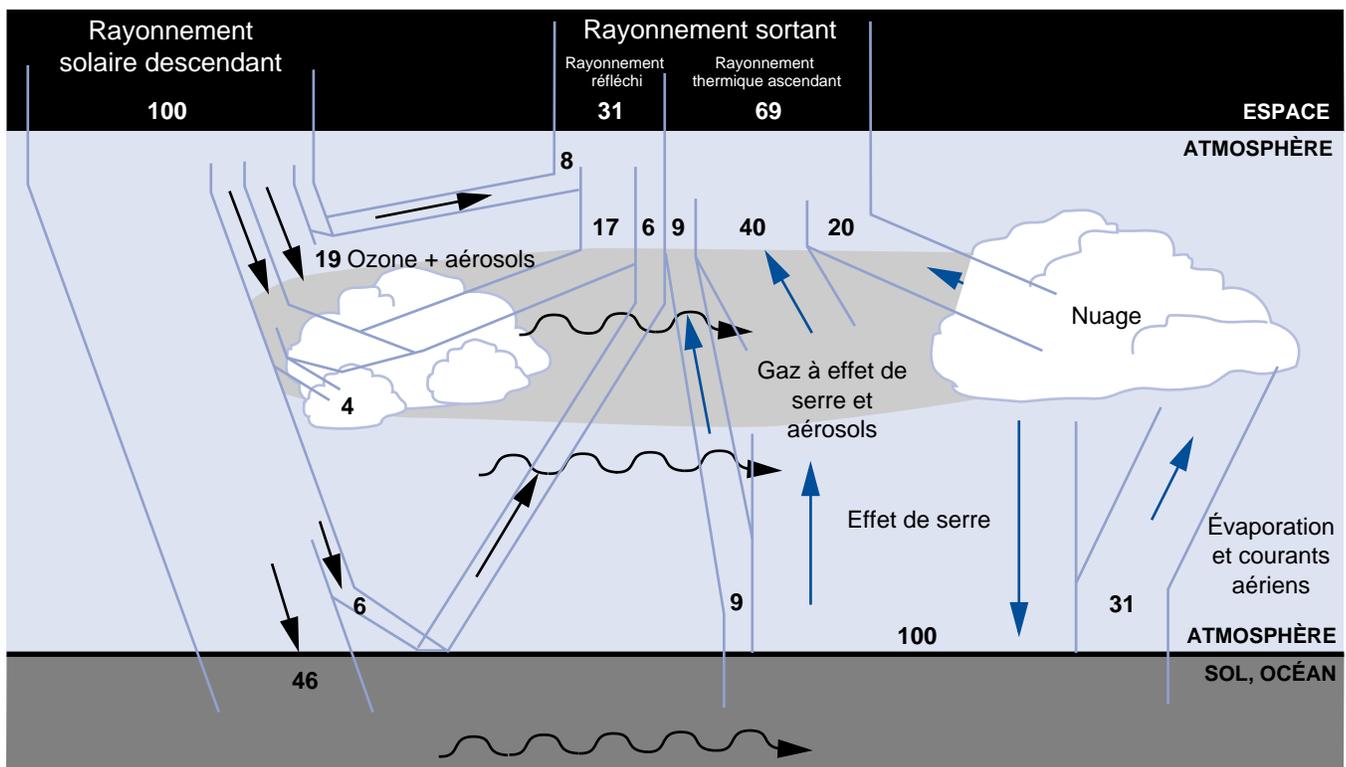
les processus climatiques. Cette fraction de 1 % se compose d'une variété d'aérosols et de gaz qui réfléchissent, absorbent et réémettent d'importantes quantités de rayonnement solaire descendant et d'énergie thermique ascendante.

Le rayonnement solaire descendant

La figure 1 montre ce qui arrive au rayonnement solaire lorsqu'il pénètre dans l'atmosphère. Seulement la moitié environ de ce rayonnement est réellement absorbée par la surface terrestre. L'autre moitié est réfléchi ou interceptée de différentes façons par les agents décrits ci-dessous.

Les gaz à l'état de traces. La plupart des gaz mineurs de l'air n'exercent pas d'influence importante sur la transmission de la lumière solaire. Cependant, l'ozone est la principale exception à cette règle. En absorbant les rayons ultraviolets de l'énergie solaire descendante, la couche d'ozone non seulement protège l'écosystème terrestre contre les effets nuisibles de ce rayonnement, mais elle retient également une portion de l'énergie solaire dans la haute atmosphère.

Figure 1
Flux d'énergie dans le système climatique mondial



SOURCE : MacCracken et Luther, 1985.

Ce diagramme décrit le flux de 100 unités d'énergie solaire dans un système climatique en équilibre. L'effet de serre ralentit le départ d'une importante partie de cette énergie et, de ce fait, le réchauffement de la surface terrestre s'intensifie. C'est pourquoi la surface de la Terre émet beaucoup plus d'énergie (140 unités) qu'elle n'en absorbe directement du Soleil (46 unités). Le système présenté étant en équilibre, les 100 unités d'énergie incidente finissent par retourner dans l'espace.

Les aérosols. Les aérosols sont de très fines particules et gouttelettes, suffisamment petites pour rester en suspension dans l'atmosphère pendant des périodes considérables. Ils se composent de minuscules gouttelettes d'acide sulfurique des éruptions volcaniques, de suie et de sulfate provenant des feux de surface et des procédés industriels, de sel des embruns marins et de poussière. Ils réfléchissent et absorbent à la fois le rayonnement solaire descendant et ce, proportionnellement à leur abondance et à leur réflectivité. On estime qu'environ 8 % du rayonnement solaire descendant est réfléchi ou rétrodiffusé dans l'espace par les aérosols. Toutefois, avec l'ozone, ces derniers absorbent et retiennent ainsi dans l'atmosphère une partie supplémentaire de l'énergie descendante, soit 19 %.

Les nuages. Les gouttelettes d'eau contenues dans les nuages ont un effet important sur l'énergie solaire descendante. Cela est dû en partie au fait que les nuages sont très nombreux dans la basse atmosphère et en partie au fait qu'ils ont un grand pouvoir réfléchissant. Ils réfléchissent donc une fraction supplémentaire de 17 % du rayonnement descendant, tout en absorbant environ 4 % de ce dernier.

La surface terrestre. La surface terrestre comprend les océans, les écosystèmes comme les forêts et les déserts ainsi que les étendues de glace et de neige. Elle réfléchit environ 6 % de la lumière solaire qui entre dans l'atmosphère.

Sur la totalité du rayonnement solaire qui pénètre dans l'atmosphère, 31 % est réfléchi vers l'espace par les aérosols, les nuages et la surface terrestre et, par conséquent, est perdu pour le système climatique. Sur les 69 % qui restent pour alimenter le système, 23 % sont absorbés dans l'atmosphère et 46 % réchauffent les continents et les océans.

Le rayonnement thermique ascendant

La surface terrestre et la basse atmosphère réchauffées par les rayons du Soleil libèrent de nouveau cette chaleur en émettant du rayonnement infrarouge. À mesure qu'il se déplace vers l'espace, ce rayonnement rencontre deux obstacles atmosphériques majeurs : les nuages et les gaz absorbants.

Les nuages. En plus de réfléchir le rayonnement solaire descendant, les nuages absorbent également de grandes quantités du rayonnement thermique ascendant. L'énergie absorbée par les nuages est réémise en grande partie vers la surface. C'est pour cette raison que l'air qui se trouve près de la surface terrestre est généralement beaucoup plus chaud par une nuit nuageuse que par temps clair. La quantité de rayonnement absorbé et réfléchi dépend de l'étendue, de l'épaisseur, de la hauteur et du type de nuages en cause.

Les gaz absorbants. Un certain nombre de gaz mineurs naturellement présents dans l'atmosphère, bien qu'assez transparents à la lumière solaire, absorbent la plus grande partie de l'énergie thermique infrarouge transmise par la Terre vers l'espace. Cette énergie est alors réémise dans toutes les directions : une partie vers la surface et une vers le haut où d'autres molécules peuvent l'absorber de nouveau. Enfin, les molécules absorbantes de la haute atmosphère émettent directement l'énergie dans l'espace. Ces gaz rendent donc l'atmosphère opaque au rayonnement ascendant, de la même manière qu'un verre opaque freine la transmission de lumière visible. Avec les nuages, ils forment une couche isolante autour de la Terre et lui conservent sa chaleur. Étant donné qu'une serre retient la chaleur à peu près de la même manière, ce phénomène a été appelé « effet de serre »; les gaz absorbants qui en sont la cause sont des « gaz à effet de serre ». Les importants gaz à effet de serre présents naturellement dans l'atmosphère comprennent la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane, l'ozone et l'oxyde nitreux.

L'ampleur de l'effet de serre naturel peut être estimée bien simplement. En théorie, l'énergie solaire qui atteint la Terre est suffisante pour permettre une température moyenne de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ à la surface, pas plus. Toutefois, nous savons d'après les mesures réelles que la température moyenne de la surface est plus proche de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, soit $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ de plus. Ce réchauffement additionnel, résultat de l'effet de serre, est suffisant pour faire la différence entre une planète, la Terre, où la vie est possible et une autre, la Lune, où elle ne l'est pas.

L'équilibre climatique

Somme toute, le climat dépend de la manière dont l'atmosphère redistribue l'énergie thermique fournie par le Soleil et absorbée par la Terre. Étant donné que l'intensité du rayonnement solaire varie avec la latitude, toutes les parties de la planète ne sont pas réchauffées également. Cet effet est plus prononcé sous les tropiques, où l'énergie reçue du Soleil est plus grande que celle renvoyée dans l'espace. Les températures y sont donc beaucoup plus élevées que la moyenne mondiale et demeurent de façon constante à quelques degrés près autour de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. À l'opposé, les régions polaires connaissent une perte nette d'énergie vers l'espace et les températures peuvent varier entre des maximums de près de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant l'été polaire de l'hémisphère Nord et des minimums bien en-dessous de $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant l'hiver polaire de l'hémisphère Sud.

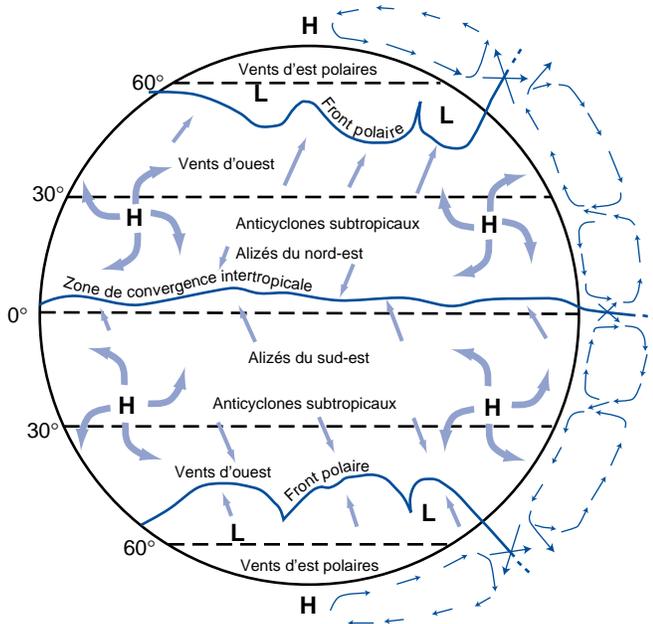
Cette grande différence de température entre les tropiques et les pôles constitue le principal moteur des courants océaniques et des vents atmosphériques. Essentiellement, ceux-ci transportent l'eau et l'air chauds de l'équateur vers les pôles, tandis que l'eau et l'air froids se déplacent en direction contraire.

Toutefois, ce flux est modifié par la rotation de la Terre et les effets des masses terrestres qui produisent un réseau complexe de courants. Ces derniers sont présentés sous forme simplifiée aux figures 2 et 3.

Étant donné que l'humidité de l'air est transportée par les courants aériens, la configuration des précipitations est aussi influencée par la circulation atmosphérique mondiale. Mais les courants océaniques, le relief et l'évaporation au-dessus des continents exercent eux aussi une très forte influence. Il s'ensuit que la distribution des précipitations autour du globe présente une configuration même plus complexe que la circulation atmosphérique (figure 4). Certaines régions reçoivent donc des surplus considérables de pluie, favorables aux écosystèmes riches et luxuriants, tandis que d'autres n'en reçoivent pas assez pour nourrir la végétation et deviennent désertiques.

De nombreux autres facteurs peuvent aussi influencer sur le climat terrestre. En plus de la circulation de l'air et des courants océaniques, on doit également considérer les effets des nuages et des énormes étendues de neige et de glace, l'influence de la topographie, des sols et de la végétation ainsi que l'impact des processus et des activités qui se déroulent dans la biosphère. À cela, il convient d'ajouter l'effet des différences dans le réchauffement solaire, non seulement entre les régions mais aussi entre les saisons et même entre la nuit et le jour.

Figure 2
Circulation atmosphérique générale



SOURCE : Adapté de Critchfield, 1983.

Tous ces éléments constituent les parties interreliées et interactives d'un système en équilibre (figure 5). Si un changement dans l'un d'eux vient perturber cet équilibre, il entraînera probablement des réactions complexes dans les autres éléments à mesure que le système s'adapte pour trouver un nouvel équilibre. Certaines de ces réactions peuvent accentuer le changement initial (*rétroaction positive*), tandis que d'autres peuvent s'y opposer et le contrebalancer en partie (*rétroaction négative*). Étant donné que le système climatique est régi par le rayonnement solaire, tout ce qui vient modifier la quantité d'énergie solaire qu'il absorbe ou la quantité nette d'énergie thermique qu'il libère entraînera des changements climatiques. Ces changements permettront au système de s'adapter jusqu'à ce que l'équilibre net entre l'énergie descendante et l'énergie ascendante soit rétabli de nouveau.

Parmi les principales causes possibles de ces changements, on peut mentionner les variations dans la teneur atmosphérique en aérosols et en gaz, de même que dans la réflectivité de la surface terrestre et l'intensité de la lumière solaire atteignant l'atmosphère. Il est clair, selon les études sur le climat du passé, que ces modifications se produisent sans cesse : sur le plan chronologique, elles ont lieu à des échelles allant de quelques mois à des millions d'années et sur le plan géographique, à des échelles tant régionales que mondiales. Cependant, la reconstitution des configurations des températures indique que ces fluctuations naturelles, tout en étant suffisantes pour causer des bouleversements considérables dans les écosystèmes terrestres, sont toujours demeurées dans l'étroite plage nécessaire au maintien de la vie sur la planète.

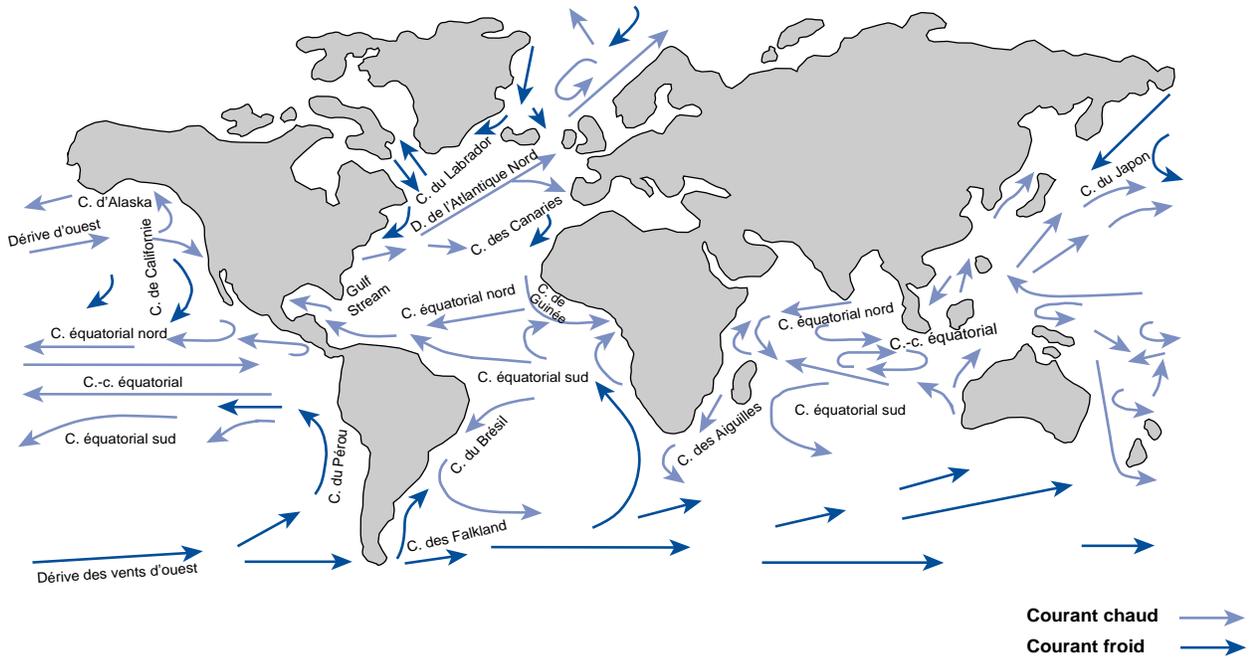
Les climats du passé

La reconstitution du climat

Le système climatique naturel de la Terre est en fait en perpétuelle évolution : c'est un système dynamique. Des forces tant extérieures qu'intérieures sont constamment à l'œuvre pour modifier le fragile équilibre existant au sein de ses composants et entre eux. Les informations tirées des sédiments terrestres, marins et lacustres, des calottes glaciaires et même de la végétation attestent clairement que des changements majeurs dans le climat du globe se sont produits dans le passé. Elles laissent aussi penser que de tels changements se produiront probablement de nouveau et de manière naturelle dans l'avenir.

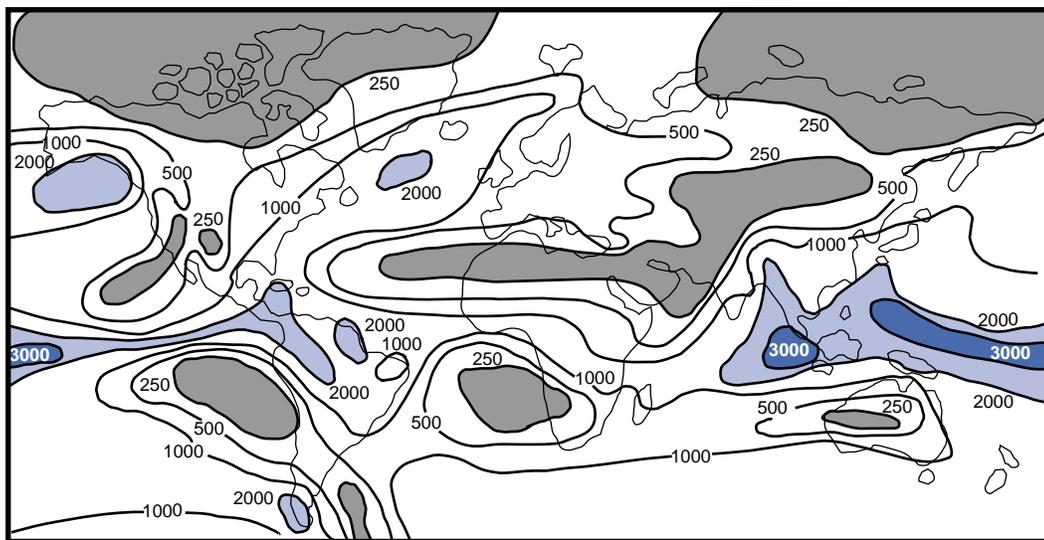
Les renseignements les plus précis dont on dispose sur les climats du passé proviennent des données recueillies scientifiquement au cours des 100 ou 150 dernières années. Consignées par des observateurs compétents à l'aide d'instruments de précision, ces données sont non seulement relativement fiables mais aussi très complètes et renferment

Figure 3
Configurations des courants océaniques



D = dérive; C = courant; C.-c. = contre-courant.
 SOURCE : Adapté de Griffiths et Driscoll, 1982.

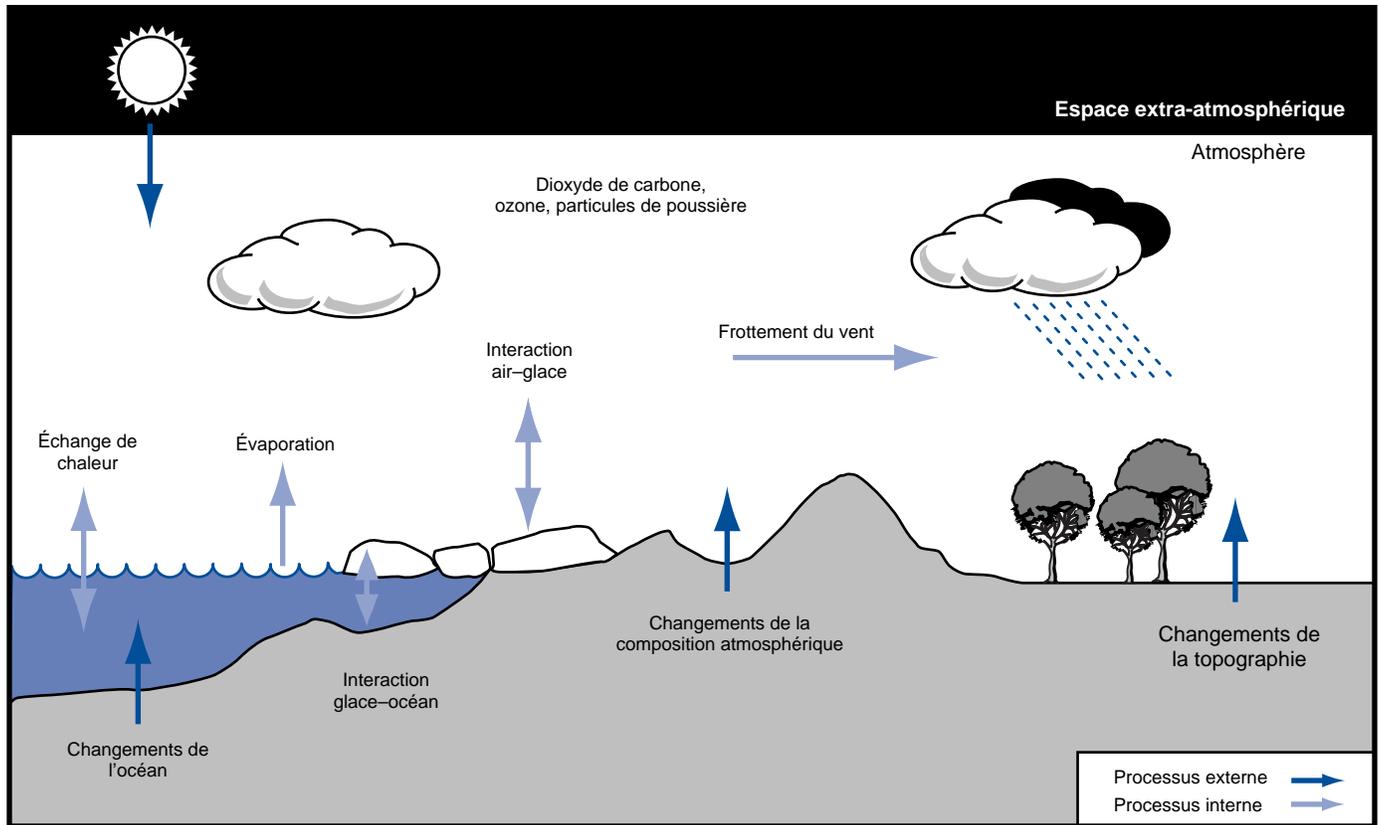
Figure 4
Répartition annuelle mondiale des précipitations (mm)



SOURCE : Adapté de Lockwood, 1974.

Les zones ombragées indiquent les extrêmes annuels : gris, moins de 250 mm; bleu pâle, plus de 2 000 mm; bleu foncé, plus de 3 000 mm.

Figure 5
Principaux éléments influant sur le système climatique mondial



SOURCE : Adapté de McKay et Hengeveld, 1990.

des variations des conditions quotidiennes et même horaires dans presque toutes les régions habitées du globe. C'est parce qu'elles sont si détaillées que ces « archives » constituent une base de données extrêmement utile à l'identification et à l'analyse des configurations climatiques récentes et même de leurs fluctuations relativement faibles.

Pour étudier de plus grandes variations climatiques sur de plus longues périodes, les scientifiques doivent avoir recours à des sources de données substitutives, c'est-à-dire des preuves indirectes grâce auxquelles ils peuvent déduire ou démontrer la nature des climats passés. La mention de conditions météorologiques, notamment pour des régions comme l'Europe et l'Asie où il existe de nombreux documents écrits, peut servir utilement de base à l'analyse du climat du dernier millénaire. Bien qu'ils ne contiennent pas des données quantitatives fiables comme les registres récents, ces documents peuvent néanmoins

apporter des renseignements qualitatifs considérables sur le climat du passé.

Cependant, quand on remonte au-delà du dernier millénaire, la reconstitution historique du climat doit avant tout s'appuyer sur les abondants indicateurs paléoclimatiques que la Terre elle-même met à notre disposition. Les pollens des plantes déposés dans les anciens marais, les sédiments des fonds lacustres et même les calottes glaciaires peuvent témoigner de la nature des saisons de croissance à l'époque du dépôt. Les restes des formes de vie aquatiques sont des témoins de la température de l'eau et de sa qualité dans le passé. Les vieilles plages indiquent les anciennes lignes de rivage et, par conséquent, le niveau de la mer. Même les bulles d'air fossilisées à l'intérieur des calottes glaciaires congelées des régions polaires révèlent la composition et les températures des anciennes masses d'air. Les cernes de croissance annuels des arbres, la composi-

tion du sol ainsi que le profil thermique de la croûte terrestre racontent eux aussi l'histoire à leur manière. Partant de cet assortiment d'indices variés et épars, les paléoscientifiques ont fourni suffisamment de renseignements pour qu'il soit possible de dresser un tableau relativement continu, bien que qualitatif, des configurations de températures à la surface du globe au cours du dernier million d'années.

Le dernier million d'années

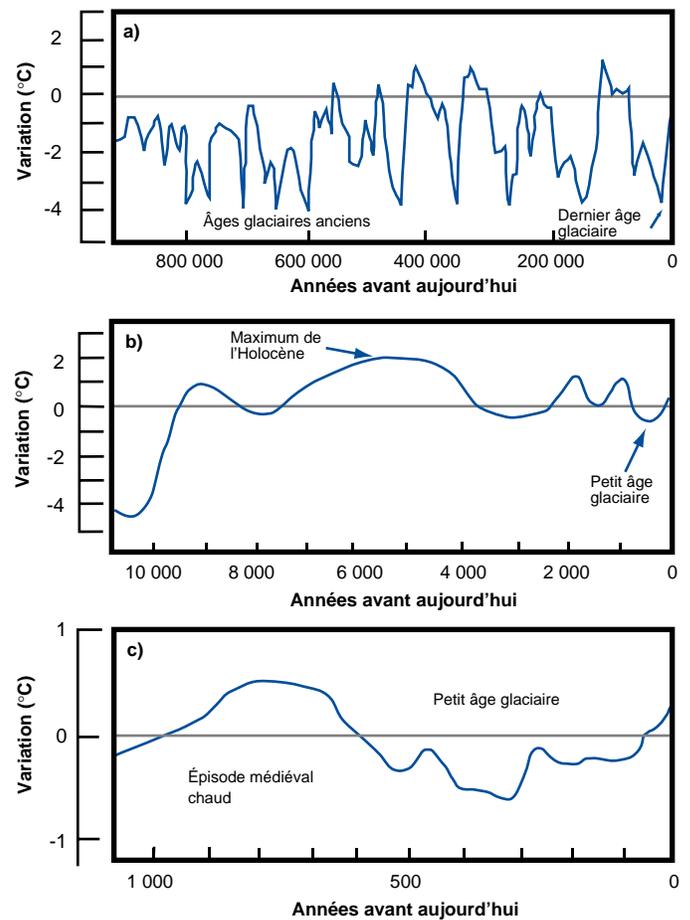
Il convient d'être prudent dans l'interprétation des archives reconstituées des climats anciens, car elles reposent sur différents indicateurs de fiabilité variable. Toutefois, on peut en tirer des renseignements utiles sur les principales configurations, avec de plus en plus de détails à mesure que l'on s'approche du présent.

On peut se faire une idée, à partir de la figure 6a, de l'histoire du climat terrestre durant le dernier million d'années. Les températures pendant une grande partie de cette période semblent avoir suivi un cycle de variations à long terme presque périodiques. Les températures minimales extrêmes, qui correspondent aux grandes glaciations, semblent s'être produites à des intervalles d'environ 100 000 ans au cours des 800 000 dernières années. Chacun de ces épisodes glaciaires a été suivi d'un réchauffement marqué (4 à 6 °C) menant à une phase interglaciaire. Pendant ce cycle de 100 000 ans, de petites anomalies se sont manifestées à des intervalles d'environ 20 000 et 40 000 ans.

La figure 6b présente les tendances plus détaillées des températures pour les 10 000 dernières années. Les températures ont atteint un sommet pendant l'actuelle période interglaciaire, il y a environ 5 000 ou 6 000 ans, et ont graduellement baissé depuis. Le sommet chaud de l'interglaciaire est généralement appelé le maximum de l'Holocène. Plusieurs « petits âges glaciaires » ou épisodes de plus grand refroidissement semblent superposés à la tendance subséquente au refroidissement, à des intervalles d'à peu près 2 500 ans, le dernier s'étant produit entre les années 1400 et 1900 de notre ère. On croit que les températures moyennes mondiales que nous connaissons aujourd'hui sont pratiquement semblables à celles d'il y a 1 000 ans, soit environ 1 °C en dessous du maximum de l'Holocène et à peu près 1 à 2 °C de moins que pendant le dernier interglaciaire d'il y a 135 000 ans (figure 6c).

On a avancé de nombreuses théories pour expliquer ces variations de températures. Selon une hypothèse qui compte beaucoup d'adeptes, les fluctuations aux 20 000 et aux 40 000 ans seraient liées aux changements dans l'orbite de la Terre autour du Soleil. Cependant, les causes du cycle de

Figure 6
Variations des températures moyennes annuelles du dernier million d'années



SOURCE : Adapté de Folland et collab., 1990.

Écarts des températures mondiales moyennes par rapport aux valeurs actuelles durant : a) le dernier million d'années; b) les 10 000 dernières années; c) le dernier millénaire.

100 000 ans soulèvent encore de nombreuses controverses. Même si l'on observe une bonne correspondance avec le cycle de 100 000 ans de l'excentricité de l'orbite terrestre, l'ampleur des changements consécutifs dans le rayonnement solaire descendant est beaucoup trop faible pour expliquer les grands cycles glaciaires–interglaciaires.

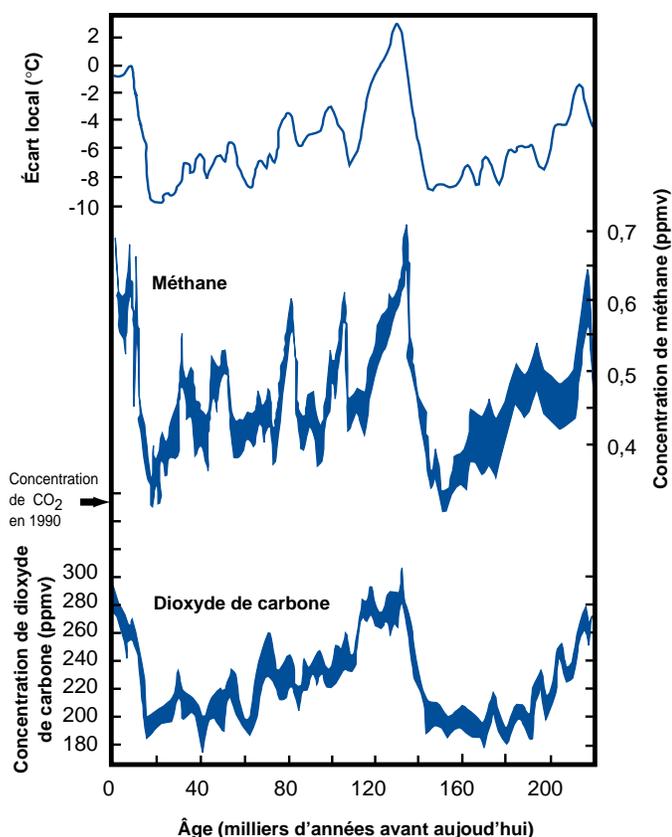
Néanmoins, l'analyse récente des carottes de glace de l'Antarctique et du Groenland indique une grande corrélation entre les changements climatiques et la concentration naturelle dans l'atmosphère du dioxyde de carbone et du méthane, deux

importants gaz à effet de serre. Comme on peut le voir à la figure 7, la correspondance entre les concentrations de dioxyde de carbone et de méthane et les températures du pôle Sud pendant les 160 000 dernières années a été très étroite. Cette relation pourrait montrer que les changements extérieurs de l'équilibre énergétique de l'atmosphère peuvent être significativement augmentés par un très puissant mécanisme de rétroaction positive auquel participerait l'effet de serre.

Le dernier millénaire

Pour ce qui est des fluctuations sur une plus courte échelle de temps, les efforts visant à établir une corrélation entre les

Figure 7
Comparaison des températures locales et des concentrations atmosphériques de méthane et de dioxyde de carbone dans l'Antarctique durant les 220 000 dernières années



ppmv = parties par 10^{-6} en volume.

SOURCE : Adapté du rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat, 1994.

La largeur du pointage indique la variabilité des données. Les températures sont comparées aux valeurs actuelles.

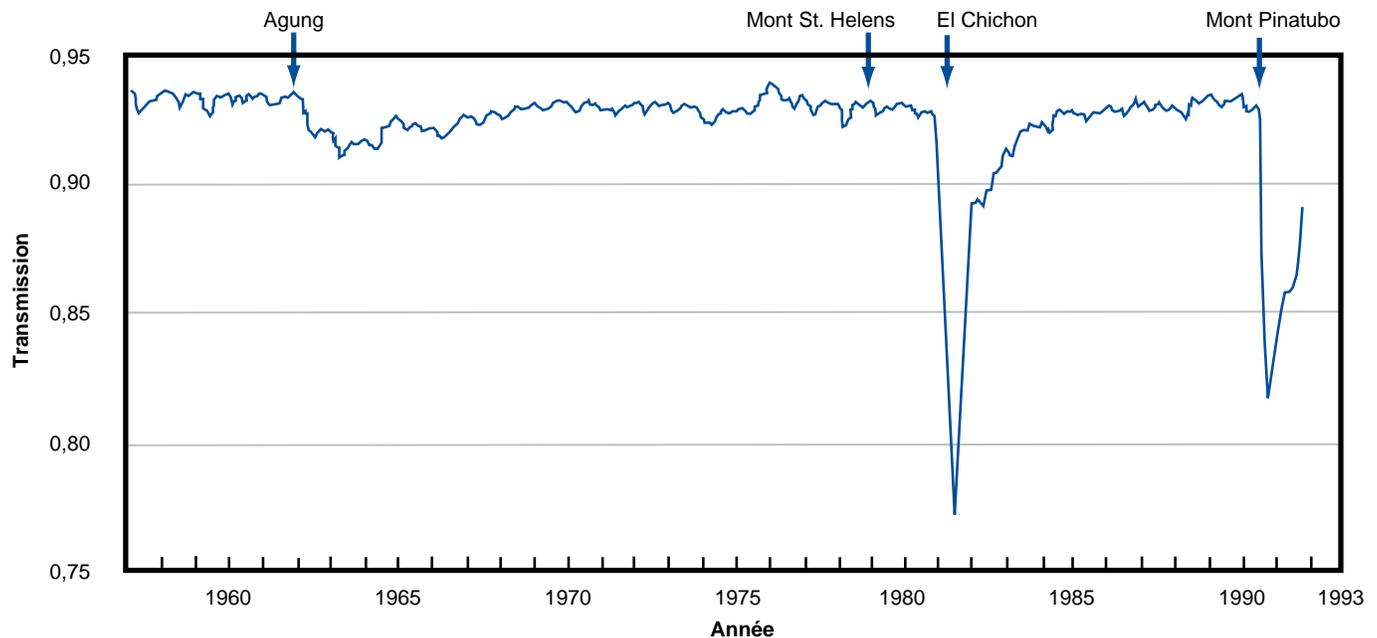
cycles de rayonnement solaire et les configurations de températures, en particulier à des intervalles de 180 et de 80 ans, ont donné certains résultats encourageants. Toutefois, aucune des corrélations ne s'est encore avérée statistiquement significative. Le facteur de forçage naturel du climat qui correspond le mieux aux récentes fluctuations des températures mondiales est la charge atmosphérique en poussière volcanique et en aérosols (figure 8). Des modifications de cette charge peuvent contribuer notablement à la variabilité interannuelle de la température mondiale et avoir des effets à beaucoup plus long terme si elles durent longtemps.

La figure 9 présente une reconstitution détaillée et assez exacte des températures mondiales au cours du dernier siècle. En compilant ce registre, les chercheurs ont scrupuleusement tenu compte de l'influence exercée par la chaleur libérée par les villes (effet d'îlot thermique urbain) et ont ajouté des données provenant d'observations sur les océans. Bien que les premières décennies du siècle aient été nettement plus froides qu'aujourd'hui, les températures se sont élevées régulièrement pendant les années 1920 et 1930 pour atteindre un sommet au milieu des années 1940. Elles ont ensuite fléchi légèrement et des valeurs un peu plus faibles ont été observées jusque vers 1975. Depuis, la tendance au réchauffement a repris, les températures mondiales atteignant de nouveaux maximums dans les années 1980 et 1990, période pendant laquelle on a enregistré les 11 années les plus chaudes des 100 dernières. À l'heure actuelle, la température moyenne de la surface terrestre est d'environ $0,5^{\circ}\text{C}$ supérieure à ce qu'elle était au XIX^e siècle.

Les climats passés du Canada

Pendant des milliers et des millions d'années, les changements dans les tendances climatiques mondiales ont donné au Canada des climats extrêmement différents de ce que nous connaissons de nos jours. En examinant ces variations, il est possible de replacer le climat actuel dans son contexte et de trouver des indications sur la nature des changements futurs. Le présent épisode interglaciaire — couvrant les 10 000 dernières années — est particulièrement utile à cet égard. L'examen des fossiles révèle que d'importantes variations climatiques se sont produites pendant cette période. Les registres historiques et les documents climatologiques des derniers siècles contiennent des preuves beaucoup plus détaillées des fluctuations récentes. Un regard jeté sur trois phases différentes de cette période — le maximum de l'Holocène il y a 5 000 à 6 000 ans, le dernier millénaire et le dernier siècle — donne une idée de la variabilité naturelle du climat même pendant un épisode à long terme assez constant comme l'interglaciaire actuel.

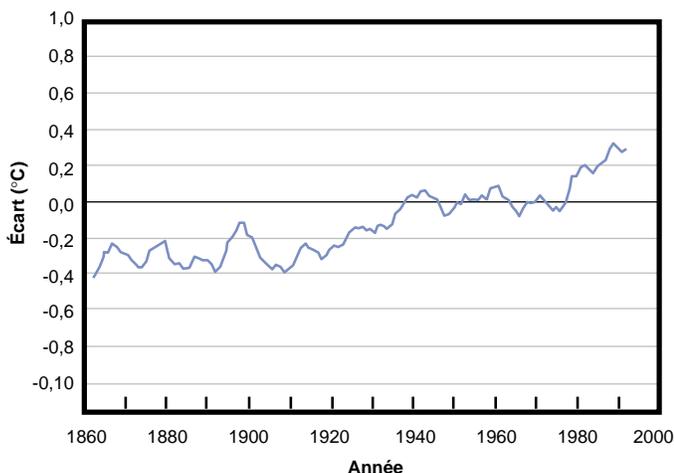
Figure 8
Effets des variations des concentrations atmosphériques d'aérosols sur la transmission de la lumière



SOURCE : Adapté du rapport de la *National Oceanic and Atmospheric Administration*, 1993.

L'augmentation des concentrations atmosphériques d'aérosols diminue la quantité de rayonnement solaire transmise dans l'atmosphère. Le graphique montre les données sur la transmission de la lumière à l'observatoire de Mauna Loa, Hawaii, de 1958 à 1993. Il indique les importantes éruptions volcaniques qui ont eu lieu durant cette période.

Figure 9
Écart de la température moyenne annuelle mondiale en surface, entre 1860 et 1994, par rapport aux moyennes de 1950–1979



SOURCE: Adapté de Boden et collab., 1994.

Le maximum de l'Holocène. Au cours du sommet chaud du présent interglaciaire, le climat canadien semble avoir été plus chaud, plus sec et plus venteux qu'aujourd'hui. Selon les recherches, les hausses des températures estivales dans le sud du pays étaient relativement modestes, mais dans l'extrême Arctique, elles étaient supérieures à 3 °C (figure 10).

Le réchauffement médiéval. Il semble que le climat de l'hémisphère Nord, il y a environ 1 000 ans, était à peu près identique à ce qu'il est de nos jours, mais nettement plus chaud (de 0,5 à 1 °C) qu'au cours de plusieurs siècles de l'intervalle. Cet épisode de chaleur ayant duré plusieurs centaines d'années, la limite des arbres et d'autres limites naturelles de la végétation se sont graduellement déplacées vers le nord. Un climat plus doux dans l'Arctique a entraîné des diminutions substantielles de la couverture de glace de mer. Ces conditions peuvent avoir encouragé non seulement la migration des Inuit dans l'Arctique, mais aussi la venue et l'installation des Vikings en Islande et au Groenland (figure 11). Les Vikings semblent avoir navigué sans encombre dans une grande partie de l'archipel canadien; au Groenland, ils ont pu se livrer à une agriculture viable.

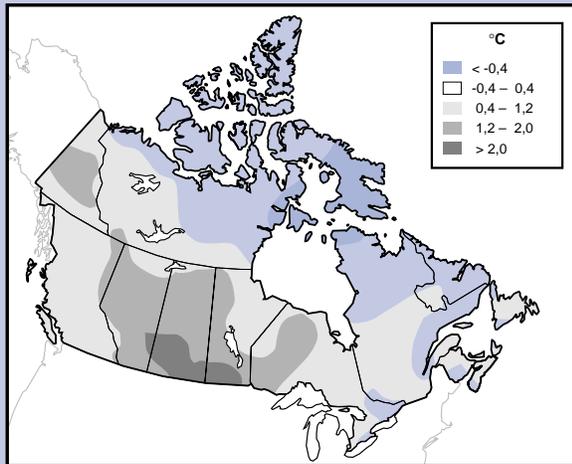
Le changement climatique au Canada

Bien que les tendances de la température moyenne mondiale, illustrées à la figure 9, indiquent que la planète dans son ensemble s'est réchauffée pendant le dernier siècle, le détail est plus compliqué. En fait, il existe parfois des différences substantielles entre les tendances de régions avoisinantes ou les saisons de l'année.

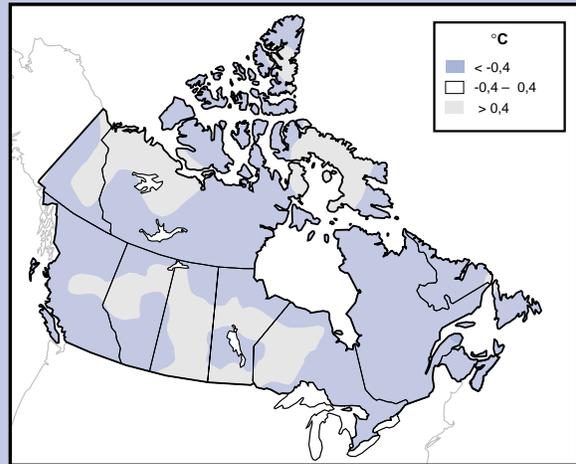
Les cartes montrent comment les températures saisonnières moyennes des années 1980 ont évolué dans différentes régions du pays lorsqu'on les compare aux conditions moyennes des 30 années précédentes. Pour

l'été, les données ne présentent pas de différences marquées. Toutefois, l'hiver et le printemps affichent une large bande de réchauffement appréciable allant du sud des Prairies jusqu'au Yukon et au secteur occidental des Territoires du Nord-Ouest, puis jusqu'à l'Alaska. Cela contraste avec un léger refroidissement sur la partie nord-ouest du Labrador et les îles de l'Arctique. Ailleurs, on note peu de changements. Pendant l'automne, l'ouest du Canada connaît de nouveau un réchauffement important, tandis que dans l'est du pays, la configuration de refroidissement devient plus étendue et plus intense, gagnant le Québec et l'Ontario.

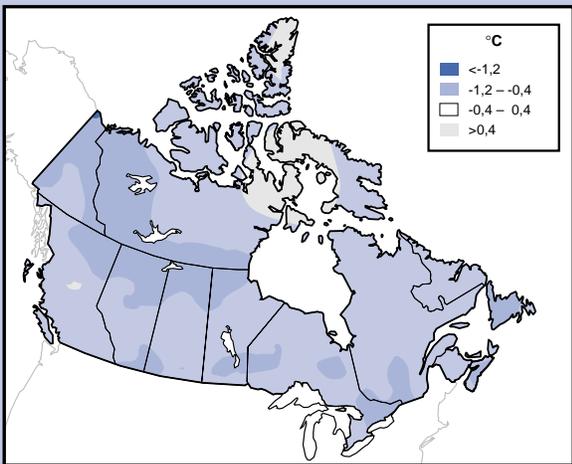
Écarts des températures printanières par rapport à la moyenne de 1951–1980 pour la décennie 1980–1989



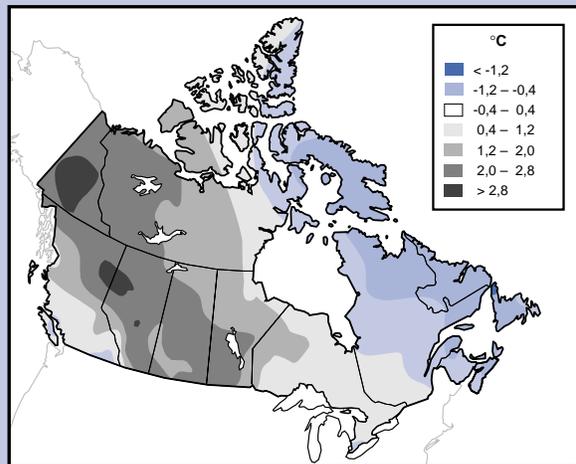
Écarts des températures estivales par rapport à la moyenne de 1951–1980 pour la décennie 1980–1989



Écarts des températures automnales par rapport à la moyenne de 1951–1980 pour la décennie 1980–1989



Écarts des températures hivernales par rapport à la moyenne de 1951–1980 pour la décennie 1980–1989



Ces cartes montrent que, au niveau régional, la tendance globale vers des climats plus chauds a été modifiée par des changements dans la configuration saisonnière des vents. En modifiant le flux net des masses d'air froid et chaud dans différentes parties du pays, ces changements ont amplifié le réchauffement dans certaines régions et à certaines saisons et l'ont atténué dans d'autres cas. Voilà un bon moyen de nous rappeler que le futur réchauffement de la planète, s'il poursuit son ascension, ne sera uniforme ni dans le temps ni dans l'espace.

Ironie du sort, les efforts européens du XVII^e au XIX^e siècle dans le but de trouver le passage du Nord-Ouest vers l'Inde ont échoué principalement parce qu'ils ont débuté après que la période médiévale de réchauffement eut cédé la place à un « petit âge glaciaire » qui a duré à peu près de 1400 à 1900. Si seulement Franklin avait essayé six siècles plus tôt! Étant donné

Figure 10
Estimation de l'augmentation des températures en Amérique du Nord durant le sommet chaud de l'Holocène, il y a 6 000 ans



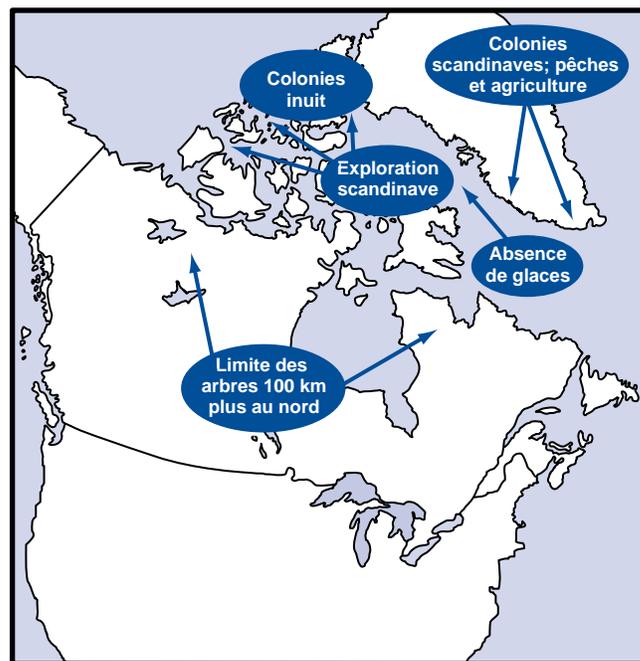
SOURCE : Adapté de Folland et collab., 1990.

que les températures actuelles ressemblent à celles de l'épisode médiéval chaud, il est probable que l'on connaîtra de nouveau la végétation et les régimes glaciels d'il y a 1 000 ans si ces températures persistent.

Le dernier siècle. Grâce à un volumineux corpus de documents scientifiques sur le sujet, les changements climatiques du dernier siècle peuvent être étudiés avec beaucoup plus de précision que ceux portant sur les périodes antérieures. Ces documents permettent d'analyser les configurations tant spatiales que temporelles des changements de façon beaucoup plus détaillée et avec une plus faible marge d'erreur.

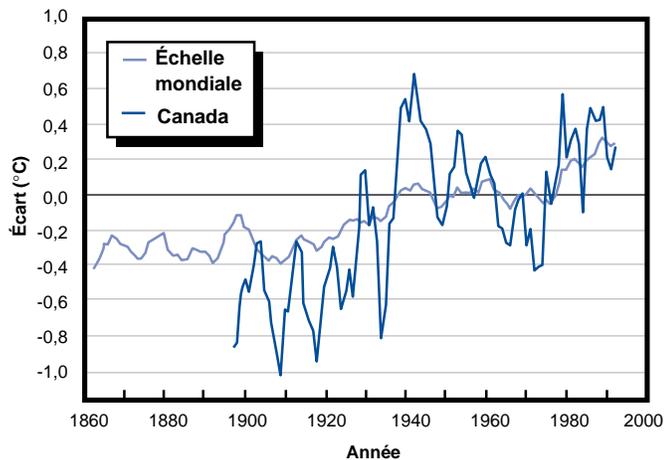
Les études de ces archives montrent que, même dans le délai relativement court d'un siècle, le climat canadien a connu des variations notables (figure 12). Les températures moyennes y présentent sensiblement la même configuration générale que les températures mondiales, soit un réchauffement jusqu'au début des années 1940, puis un refroidissement modéré jusque vers 1975 suivi d'un nouveau réchauffement plus prononcé persistant jusque dans les années 1980. Néanmoins, les variations ont été plus marquées au Canada.

Figure 11
Conditions dans l'Arctique pendant l'épisode médiéval chaud, il y a 1 000 ans



SOURCE : Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada.

Figure 12
Tendances mondiales et canadiennes des températures de surface depuis 1860



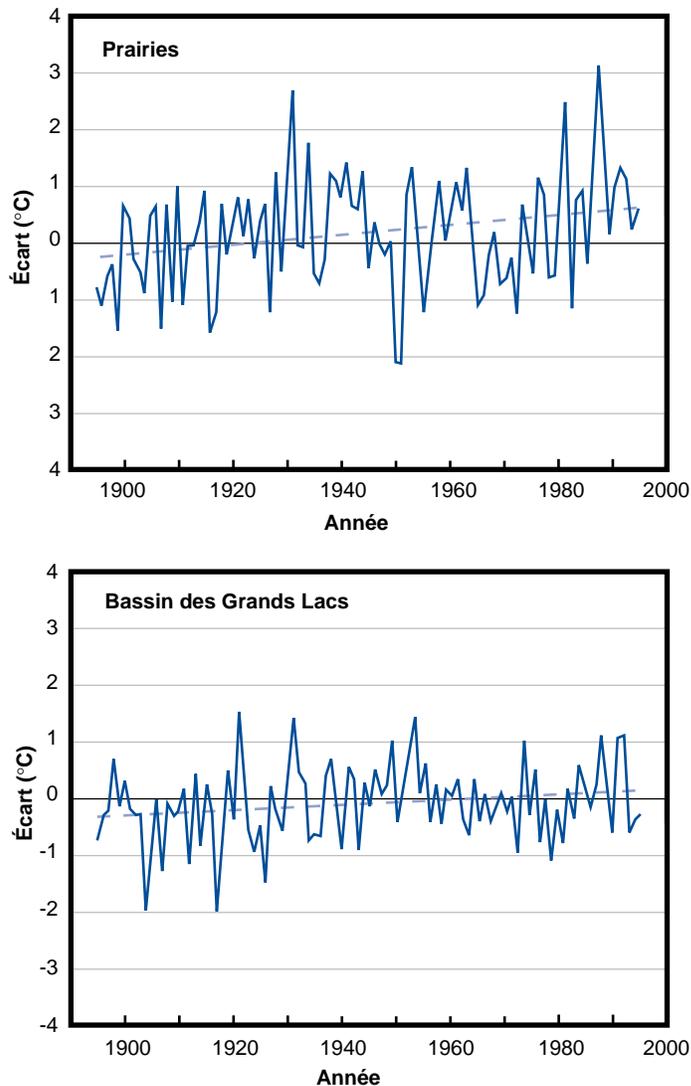
SOURCES : Boden et collab., 1994; Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada.

Écarts des températures moyennes annuelles par rapport à la moyenne de 1950–1979 (représentée par la ligne correspondant à 0,0 °C).

Considérant les configurations climatiques régionales au Canada (figure 13), la tendance au refroidissement du milieu du siècle semble avoir été beaucoup plus prononcée dans l'ouest du pays et débute presque une décennie plus tôt que dans l'Est. De plus, bien que les tendances des 30 dernières années indiquent un réchauffement marqué en hiver et au printemps, notamment dans l'Ouest, les étés ne présentent guère de changement, et le refroidissement dans l'est du pays est le plus significatif en automne (voir « Le changement climatique au Canada »).

Toutes ces tendances doivent nous rappeler que le réchauffement accru des dernières années n'est pas sans précédent dans l'histoire du climat mondial. Ce que nous avons connu jusqu'ici reste dans les limites des variations climatiques naturelles de l'ère préindustrielle. Toutefois, si la tendance des dernières années devait se poursuivre, ces limites seraient rapidement dépassées, et nous pourrions entrer dans une période de changement climatique bien différente de tout ce qu'a connu le dernier million d'années.

Figure 13
Tendances des températures dans deux régions du sud du Canada



SOURCE : Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada.

Variations des températures moyennes annuelles pour les Prairies et le bassin des Grands Lacs dans le sud du Canada. On présente l'écart des températures par rapport à la moyenne de 1958–1979. Les lignes pointillées représentent les tendances à long terme.

Chapitre 2

L'amplification de l'effet de serre

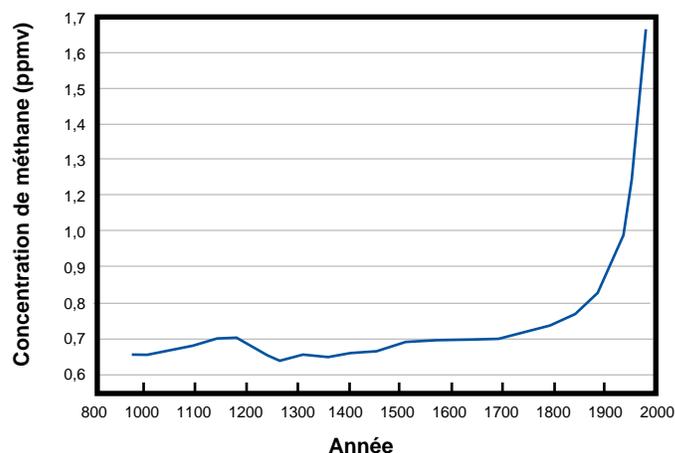
L'analyse des carottes de glace extraites des calottes polaires apporte quelques indications importantes sur la relation qui a existé entre l'effet de serre naturel et le climat terrestre. Les carottes du Groenland et de l'Antarctique — dont la plus profonde a pénétré à plus de 2 km sous la surface de la glace polaire australe — se sont révélées particulièrement instructives. Grâce à elles, des scientifiques ont pu reconstituer les températures de même que les concentrations de dioxyde de carbone et de méthane dans les régions polaires au cours des 220 000 dernières années.

Quand on les compare, ces deux séries de données présentent une corrélation remarquable, notamment pour la transition entre les périodes glaciaires de refroidissement et interglaciaires de réchauffement (figure 7). Les processus intervenant dans cette relation ne sont pas encore bien compris. Toutefois, des indices portent à croire que les concentrations des gaz à effet de serre ont varié significativement dans le passé et que ces variations ont pu jouer un rôle important dans les changements considérables qui ont touché les températures à l'échelle du globe.

Les carottes de glace permettent de confirmer que les concentrations des gaz à effet de serre sont variables, mais elles montrent aussi que ces variations peuvent avoir des limites naturelles. Pendant les 220 000 dernières années, les concentrations de dioxyde de carbone ne sont jamais descendues en dessous d'environ 190 parties par 10^{-6} en volume (ppmv) et n'ont jamais été, du moins jusque tout récemment, supérieures à 290 ppmv (figure 7). De même, les concentrations de méthane semblent être restées dans une marge assez étroite de 0,3 à 0,7 ppmv durant la même période.

Toutefois, les récentes mesures des concentrations des gaz à effet de serre des derniers siècles, encore obtenues grâce aux carottes de glace, révèlent que la tendance est en train de s'écarter de façon importante des anciens modèles. Comme on peut le voir à la figure 7, la concentration actuelle de dioxyde de carbone est supérieure à 355 ppmv, dépassant de plus de 20 % les valeurs les plus élevées des 220 000 dernières années. La concentration de méthane semble avoir plus que doublé par rapport aux valeurs de l'ère préindustrielle (figure 14), tandis que celle de l'oxyde nitreux a connu une augmentation beaucoup plus modérée, soit à peu près 8 %. Si ces gaz sont véritablement les principaux acteurs dans l'effet de serre naturel, l'augmentation de leur concentration laisse présager

Figure 14
Variations des concentrations atmosphériques de méthane durant les 1 000 dernières années



ppmv = parties par 10^{-6} en volume.

SOURCE : Adapté du rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat, 1994.

une amplification possible de cet effet bien au-delà de tout ce que la planète peut avoir connu au moins pendant le dernier million d'années.

Au cours des dernières décennies, les chercheurs ont consacré des efforts intenses à l'obtention d'une mesure plus exacte des concentrations de ces gaz. Ils ont essayé aussi de mieux comprendre les processus qui entraînent en jeu lors de l'émission et de l'élimination de ces gaz dans l'atmosphère et d'être mieux à même d'estimer les concentrations à venir.

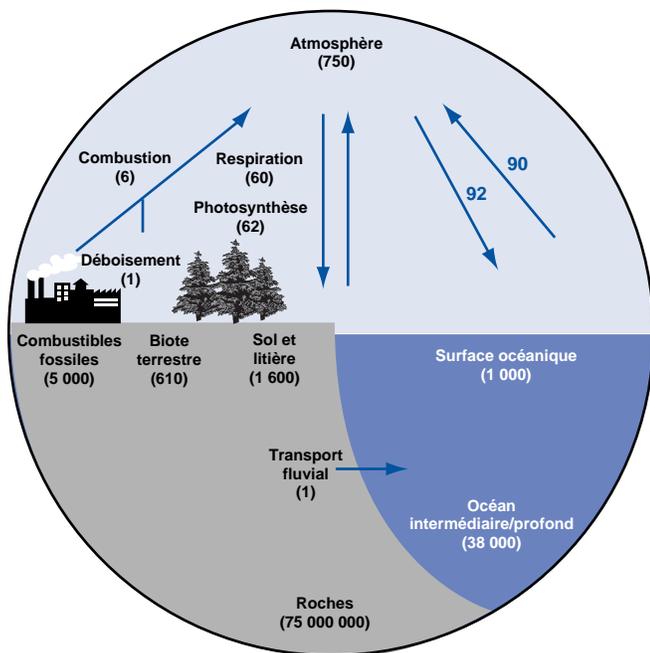
Le dioxyde de carbone

Comprendre comment la quantité de dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique se modifie n'est pas une tâche facile. Ce gaz est constamment éliminé de l'air par le transfert du carbone aux substances biotiques par photosynthèse et par absorption directe dans l'eau. À son tour, ce carbone est réévacué dans l'air par la respiration des plantes et des animaux, la putréfaction de la biomasse morte, le dégazage des surfaces d'eau et la combustion (figure 15). Le dioxyde de carbone est aussi injecté directement dans l'atmosphère par les éruptions volcaniques.

Les zones de stockage de carbone les plus actives de l'écosystème sont la biosphère terrestre, l'atmosphère et les océans. Ces trois réservoirs contiennent environ 600, 750 et 39 000 milliards de tonnes (gigatonnes, ou GT) de carbone, respectivement. L'atmosphère échange chaque année environ 90 Gt de carbone avec l'océan et environ 60 Gt avec les plantes vivantes. En une dizaine d'années, la quantité nette de carbone prélevée dans l'atmosphère par les processus naturels est à peu près égale à la quantité libérée.

Les sols, les roches et les combustibles à base de carbone constituent aussi de vastes réservoirs de cet élément. Les estimations indiquent que les sols peuvent en contenir jusqu'à 1 600 Gt. Les combustibles carbonés en contiennent approximativement 5 000 Gt, tandis que les roches en emmagasinent encore bien davantage (une estimation de 75 millions de gigatonnes). Toutefois, ces réservoirs, à moins d'être perturbés par des causes non naturelles, n'échangent le carbone avec l'atmosphère que très lentement et sur de très longues périodes.

Figure 15
Le cycle du carbone à l'échelle du globe



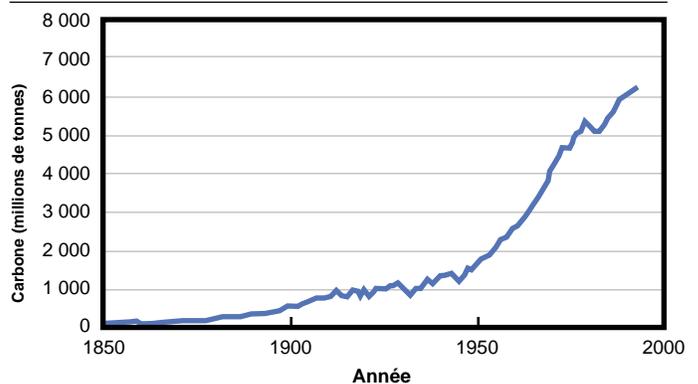
SOURCE : Données tirées du rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat, 1994.

Le diagramme montre le cycle du carbone et les zones de stockage de ce gaz, en milliards de tonnes.

De nos jours, l'activité humaine semble influencer significativement sur l'équilibre naturel à l'intérieur du cycle du carbone à l'échelle du globe. La conversion à grande échelle des terres forestières en terres agricoles aurait, pendant le dernier siècle, libéré plus de 100 Gt de carbone dans l'air. Le taux annuel des nouveaux rejets de carbone attribuables au déboisement peut même être plus rapide maintenant, surtout à cause des opérations de brûlage à grande échelle des rémanents des forêts tropicales de l'Amérique du Sud, de l'Afrique et de l'Asie du Sud-Est. Malgré que la croissance de nouvelles forêts dans l'hémisphère Nord puisse compenser partiellement ces rejets, la nouvelle contribution biosphérique de carbone dans l'atmosphère due aux activités humaines se situerait, selon les estimations, entre 0 et 2 Gt par an.

Néanmoins, l'extraction toujours accrue des combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) de la croûte terrestre pour répondre aux demandes énergétiques d'une société mondiale en industrialisation constante a une importance beaucoup plus grande. Pendant la combustion, le carbone contenu dans les combustibles fossiles s'oxyde et est libéré sous forme de dioxyde de carbone. Chaque tonne de carbone brûlé dégage 3,7 tonnes de dioxyde de carbone. La production de ciment apporte elle aussi une contribution, quoique modeste (à peu près 2 %), à ces émissions. On estime que ces sources ajoutent chaque année dans l'atmosphère 6,2 Gt de carbone, ou 23 Gt de dioxyde de carbone, soit plus de dix fois le taux du début du siècle (figure 16).

Figure 16
Teneur en carbone des émissions annuelles mondiales de dioxyde de carbone provenant de la combustion des combustibles fossiles et de la production de ciment, 1860–1991

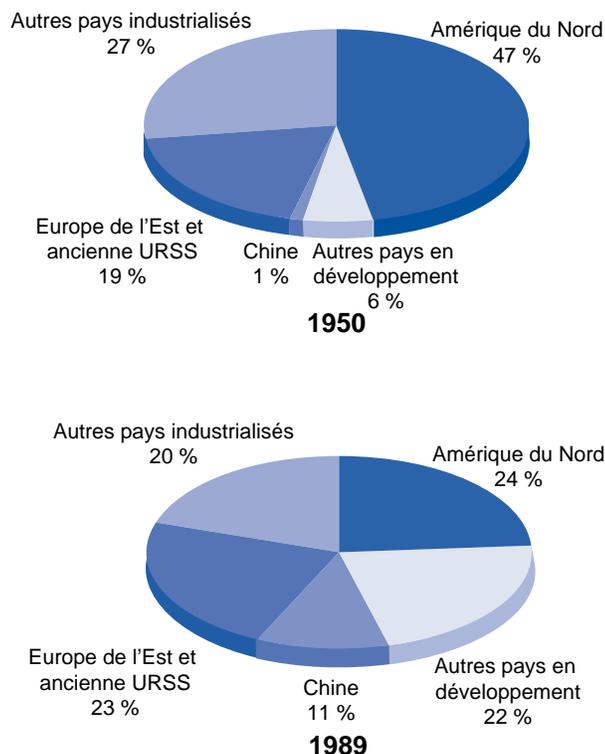


SOURCE : Boden et collab., 1994.

Comme on peut s'en douter, les émissions de dioxyde de carbone provenant de l'utilisation de combustibles fossiles sont très inégalement réparties dans le monde, la plus large part revenant aux pays développés de l'hémisphère Nord. Toutefois, les émissions augmentent à un rythme accéléré dans plusieurs pays en développement (figure 17), notamment en Chine et en Inde. Si ces tendances persistent, il est probable que les émissions mondiales de dioxyde de carbone seront beaucoup plus élevées dans l'avenir.

Les émissions anthropiques (attribuables à l'activité humaine) de dioxyde de carbone semblent encore assez faibles comparativement aux quantités énormes qui pénètrent dans l'air et en ressortent par des processus naturels. De fait, l'activité humaine produit annuellement à peu près un vingtième du dioxyde de carbone d'origine naturelle. Néanmoins, c'est là un ajout net à un aspect du cycle du carbone déjà en équilibre relatif. De plus, cet apport est cumulatif dans le temps.

Figure 17
Répartition régionale des émissions de dioxyde de carbone provenant de la combustion des combustibles fossiles, 1950 et 1989

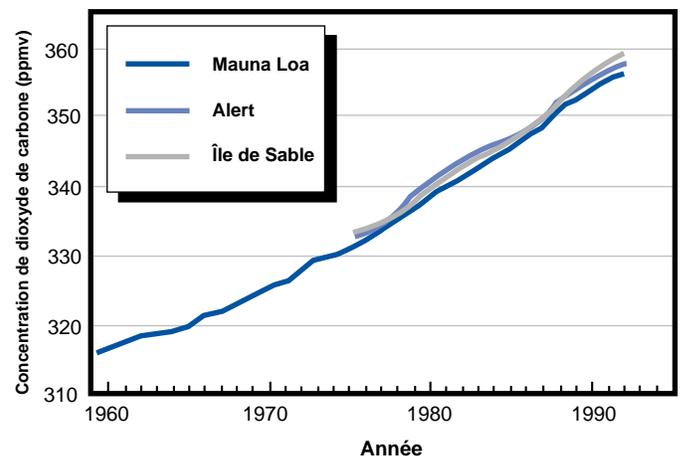


SOURCE : World Resources Institute, 1992.

Au cours des 30 dernières années, on a soigneusement mesuré en plusieurs endroits de la planète les concentrations de dioxyde de carbone, et les résultats de ces additions ne prêtent à aucune équivoque. Les tendances (figure 18) montrent des taux actuels d'augmentation d'environ 1,8 ppmv (0,5 %) par an et une hausse nette de 13 % en 35 ans. Ce taux de progression est en fait significativement inférieur à ce qu'il pourrait être si toutes les émissions anthropiques de dioxyde de carbone devaient rester dans l'atmosphère. Cependant, près de 50 % de ces émissions se réinsèrent dans le cycle naturel du carbone. Bien que le puits net de ce processus d'élimination du carbone soit encore mal compris, on croit que les écosystèmes océaniques et terrestres constituent d'importants réceptacles. En somme, le système naturel semble en mesure d'absorber une partie des émissions anthropiques, mais une partie seulement.

Il est très difficile de prévoir ce que seront les concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. C'est autour des futurs taux d'émission de dioxyde de carbone provenant de l'activité humaine que règne la plus grande incertitude. Ces taux dépendent de plusieurs variables. Par exemple, quel sera le rythme de la croissance démographique mondiale? Aurons-nous recours à l'avenir aux sources d'énergie actuelles? Notre consommation d'énergie sera-t-elle plus efficace? Et jusqu'où les pays en développement amélioreront-ils leur niveau de vie et, par conséquent, augmenteront-ils leur

Figure 18
Concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone



ppmv = parties par 10^{-6} en volume.

SOURCE : Données tirées de Boden et collab., 1994, et fournies par le Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada.

Le diagramme montre les concentrations de dioxyde de carbone mesurées à une station tropicale et à deux stations canadiennes.

consommation d'énergie? La réponse à ces questions dépendra de décisions humaines, d'actions politiques ainsi que de progrès technologiques et socio-économiques eux-mêmes largement imprévisibles. On estime que, d'ici 2050, les émissions annuelles de dioxyde de carbone d'origine anthropique pourraient osciller entre au minimum 40 % des niveaux actuels (dans l'hypothèse d'une efficacité énergétique optimale et de l'utilisation de combustibles non fossiles) et au maximum 400 % (dans l'hypothèse d'une forte consommation de charbon sans amélioration de l'efficacité énergétique).

Il existe aussi, à un degré moindre mais tout de même important, des incertitudes sur la quantité de dioxyde de carbone retenue dans l'atmosphère. Le système naturel continuera-t-il d'en éliminer 50 % ou même davantage par absorption dans la biosphère terrestre ou les océans? La fraction restant dans l'atmosphère augmentera-t-elle avec le temps? Jusqu'ici, la réponse demeure incertaine et il faut attendre les résultats de recherches et d'observations intensives plus poussées sur le cycle naturel du carbone.

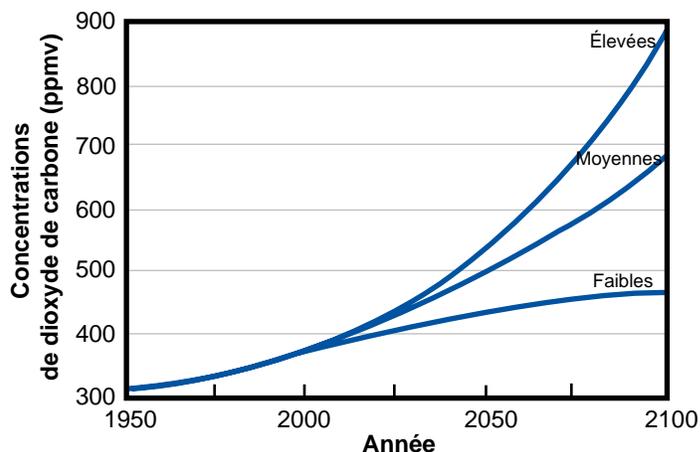
Face à ces incertitudes, les meilleures estimations des futures concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone se prêtent à divers scénarios. Le plus sombre prévoit le doublement possible, dès le milieu du siècle prochain, des concentrations existant à l'ère préindustrielle. Un autre, un peu moins pessimiste, laisse entrevoir un doublement probable d'ici la fin du siècle prochain. Toutefois, un scénario optimiste suppose une stabilisation des concentrations avant qu'elles n'aient doublé (figure 19).

Le méthane

Le méthane (CH_4) est le produit naturel de la décomposition de la matière organique en l'absence d'oxygène. Bien que les concentrations de méthane n'aient pas fait l'objet de mesures continues depuis aussi longtemps que celles du dioxyde de carbone, les études de la dernière décennie portent à croire qu'elles augmentent au rythme d'à peu près 0,7 % par an et qu'elles sont déjà supérieures de 100 % aux valeurs préindustrielles mesurées dans les carottes de glace (figure 14).

Tout comme le dioxyde de carbone, le méthane est cyclé naturellement entre la surface de la Terre et l'atmosphère. Les milieux humides en sont la principale source, d'où son nom populaire de « gaz des marais ». Il est aussi libéré par le processus digestif d'insectes comme les termites et de ruminants comme les moutons et les bovins. Même si la superficie totale des milieux humides naturels est en voie de diminution à cause de l'intervention humaine, celle des rizières semble s'accroître rapidement, tandis que la population totale de bétail domestique

Figure 19
Projections des concentrations futures de dioxyde de carbone dans l'atmosphère



ppmv = parties par 10^6 en volume.

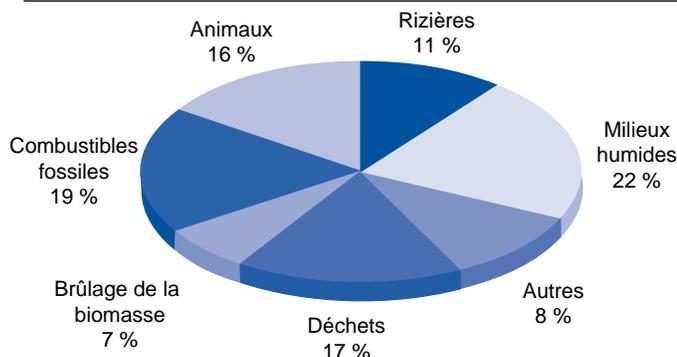
SOURCE : Adapté du rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat, 1994.

Le scénario prévoyant des concentrations élevées suppose une forte croissance et une utilisation élevée de combustibles fossiles; celui prévoyant des concentrations faibles suppose une croissance économique peu élevée et une réduction de l'utilisation des combustibles fossiles à des fins énergétiques.

à quadruplé pendant le dernier siècle. Les autres sources comprennent les procédés industriels, l'extraction des combustibles fossiles et les déchets enfouis (figure 20).

L'augmentation des émissions de méthane résulte avant tout des changements dans l'utilisation des terres dus à la croissance rapide et constante de la population mondiale et d'une augmentation connexe de l'utilisation de combustibles fossiles à des fins énergétiques. Comme il est peu probable que la population mondiale se stabilise d'ici au moins un siècle, on peut s'attendre à ce que ces changements se poursuivent et qu'il y ait de nouvelles hausses des émissions de méthane. En même temps, le taux d'élimination du méthane de l'atmosphère par des processus naturels pourrait ralentir. La réaction avec le radical hydroxyle constitue le principal puits atmosphérique du méthane, mais les concentrations du radical hydroxyle devraient diminuer par suite de réactions plus fréquentes avec les concentrations accrues de méthane et d'autres polluants chimiques présents dans les zones urbaines. La combinaison de ces tendances indique que la contribution du méthane à l'amplification de l'effet de serre continuera de s'accroître au cours du prochain siècle.

Figure 20
Estimation de la contribution de diverses sources aux émissions totales de méthane à l'échelle du globe



SOURCE : Données tirées du rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat, 1994.

Les autres gaz à effet de serre

Les concentrations d'oxyde nitreux (N_2O) augmentent maintenant de 0,2 à 0,3 % par année et les valeurs actuelles sont d'environ 8 % supérieures à celles de l'ère préindustrielle. Bien que le cycle naturel et l'étendue des sources anthropiques de ce gaz demeurent mal compris, on estime que l'augmentation des concentrations atmosphériques d'oxyde nitreux est surtout due aux engrais à base d'ammoniac (tant sous forme de produits chimiques que de déjections animales). Parmi les autres importantes sources, on compte la production d'acides adipiques (utilisés dans la fabrication du nylon), le brûlage de la biomasse et l'utilisation de carburants fossiles dans les véhicules munis de convertisseurs catalytiques.

L'ozone (O_3) se trouve à l'état naturel en concentrations infimes dans les 10 à 15 premiers kilomètres de l'atmosphère (la troposphère). Une partie provient de la haute atmosphère (la stratosphère) où elle est produite directement à partir de l'oxygène par photodissociation. Cependant, au cours du dernier siècle, l'ozone a été produit en quantités de plus en plus grandes près de la surface de la Terre par des processus chimiques auxquels participent les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone, d'autres polluants atmosphériques et le rayonnement solaire. Bien que l'ozone troposphérique soit détruit très rapidement, les quantités près de la surface semblent avoir augmenté de quelque 50 % dans plusieurs régions de l'hémisphère Nord au cours des dernières décennies. Cette augmentation régionale à basse altitude résulte principalement de la pollution attribuable au transport et aux sources fixes de

combustion. Toutefois, le taux d'augmentation de la quantité d'ozone à basse altitude semble avoir diminué de façon importante dans les pays industrialisés au cours des années 1980. En outre, on comprend encore mal les tendances dans la haute troposphère, là où l'ozone est plus actif comme gaz à effet de serre. Enfin, la réduction de la quantité d'ozone attribuable aux chlorofluorocarbures (CFC) et à d'autres substances destructrices d'ozone (voir ci-dessous) pourrait compenser grandement les effets de réchauffement associés à l'augmentation de la quantité d'ozone dans la troposphère. Par conséquent, l'incidence nette de la modification des quantités d'ozone sur l'effet de serre reste mal définie.

Les hydrocarbures halogénés contiennent du chlore, du fluor et du brome et sont, à nombre égal de molécules, parmi les gaz à effet de serre les plus puissants de l'atmosphère (voir l'encadré de la page 30). Ils n'existent pas à l'état naturel mais sont produits industriellement en grandes quantités. Les membres les plus connus de ce groupe de produits chimiques sont les CFC, largement utilisés dans les solvants, les fluides frigorigènes, les propulseurs d'aérosol et les agents gonflants pour mousse. Les halons, des dérivés bromés utilisés comme produits extincteurs, sont également importants.

Parce que ces hydrocarbures halogénés et de nombreux autres sont très stables et ne réagissent pas rapidement avec d'autres gaz, chaque molécule libérée dans l'atmosphère peut y demeurer des dizaines et même des centaines d'années, tant qu'elle n'a pas atteint la haute atmosphère où elle est finalement dissociée par le rayonnement ultraviolet intense. Cette dissociation libère du chlore et du brome qui détruisent les molécules d'ozone à haute altitude (chapitre 6). Bien que les concentrations atmosphériques des principaux CFC soient encore assez faibles, certaines augmentent au rythme de plus de 4 % par an et on les soupçonne déjà d'être des facteurs importants de l'amplification de l'effet de serre. Toutefois, le rythme d'augmentation des concentrations de CFC a déjà commencé à diminuer en raison des mesures internationales prises aux termes du Protocole de Montréal pour en réduire les émissions. De plus, comme on l'a mentionné, l'action de ces substances sur les concentrations d'ozone troposphérique peut compenser indirectement quelques-uns de leurs effets de serre directs. Donc, comme avec l'ozone, l'effet net des hydrocarbures halogénés destructeurs d'ozone sur le système climatique demeure incertain.

Même si la vapeur d'eau est en réalité l'agent le plus puissant de tous les gaz à effet de serre, elle n'est pas un facteur essentiel de l'amplification de l'effet de serre. Cependant, elle sera un facteur de rétroaction tant positive que négative à mesure que les températures s'élèveront. Étant donné que l'air

Les gaz à effet de serre : une comparaison

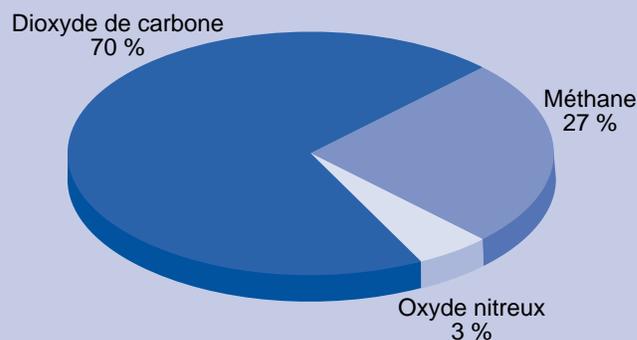
À nombre égal de molécules, le dioxyde de carbone est le moins efficace des principaux gaz à effet de serre. Par comparaison, le méthane absorbe et réfléchit environ 21 fois plus d'énergie thermique, tandis que l'oxyde nitreux est à peu près 206 fois plus actif. Les CFC sont encore plus puissants, chaque molécule absorbant 15 000 fois plus de chaleur qu'une molécule de dioxyde de carbone.

Cependant, la contribution globale de chaque gaz à effet de serre dépend aussi de plusieurs autres facteurs. L'un d'eux est la quantité annuelle de chaque gaz émise dans l'atmosphère. En poids, les émissions de méthane ne représentent qu'environ 1 % de celles du dioxyde de carbone, celles des autres gaz à effet de serre étant encore moins élevées. Un autre facteur est le temps pendant lequel chaque gaz reste dans l'atmosphère avant d'être détruit par les réactions chimiques ou absorbé par la biosphère ou l'océan. Comparativement à l'impact d'autres gaz à effet de serre, par exemple, celui du méthane est atténué quelque peu en raison d'un temps de séjour relativement court (environ 10 ans). Les émissions de méthane ont donc tendance à s'accumuler lentement, tout comme l'argent dans un compte bancaire où les dépôts sont un peu plus élevés que les retraits. Les gaz dont le temps de séjour est plus long, tels que l'oxyde nitreux et les CFC, ont toutefois un taux d'élimination beaucoup plus faible et les nouvelles émissions ont un effet cumulatif plus marqué. Bien qu'il soit difficile d'établir des comparaisons exactes, il est probable qu'à long terme, chaque tonne de CFC rejetée dans l'atmosphère aura un effet de réchauffement des milliers de fois plus marqué que la même quantité de dioxyde de carbone. On peut s'attendre à ce que l'effet d'un même nombre de molécules d'oxyde nitreux sera plusieurs centaines de fois supérieur à celui du dioxyde de carbone, tandis que l'effet direct du méthane sera un peu plus de dix fois supérieur.

chaud peut contenir plus d'humidité et que les températures plus élevées feront évaporer davantage d'eau de la surface terrestre, la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère augmentera. Ce phénomène accentuera l'effet de serre, mais l'humidité supplémentaire de l'atmosphère contribuera aussi à la formation des nuages. Cela aura pour effet de réduire grandement la quantité d'énergie solaire qui réchauffera la surface terrestre, ce qui atténuera partiellement l'augmentation du réchauffement par effet de serre causé par la vapeur d'eau.

Le troisième facteur important est l'effet indirect que les émissions de chaque gaz à effet de serre auront sur la chimie de l'atmosphère et la concentration des autres gaz à effet de serre. Par exemple, le méthane réagit avec les molécules du radical hydroxyle pour produire du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau. Toutefois, en réduisant les concentrations de ces molécules, le méthane accroît sa propre durée de vie et contribue à l'augmentation de la quantité d'ozone. Ces effets indirects peuvent être encore plus significatifs que les effets directs. Par contre, l'effet indirect de l'appauvrissement de l'ozone par les CFC peut contribuer à un refroidissement régional en surface, ce qui pourrait compenser de façon importante l'effet de serre direct.

En tenant compte des facteurs ci-dessus, on estime que la contribution nette des émissions de dioxyde de carbone à l'augmentation du potentiel de réchauffement du globe au cours de la dernière décennie est de 2 à 3 fois celle du méthane et d'environ 15 fois celle de l'oxyde nitreux. Les effets nets des émissions d'hydrocarbures halogénés et des variations des concentrations et de la répartition de l'ozone sont encore incertains, mais ils pourraient aussi être très importants.



Les autres influences humaines

Nul doute que l'augmentation de l'effet de serre naturel sera la principale conséquence de l'action humaine sur le climat de la planète. Toutefois, les activités humaines peuvent aussi influencer considérablement de diverses manières sur le climat local et régional. Les effets de certaines de ces activités pourraient en définitive devenir plus importants à l'échelle mondiale.

L'évolution de l'utilisation des terres. À mesure que les humains remplacent la forêt par des terres agricoles ou la végétation naturelle par de l'asphalte et du béton, ils modifient grandement la façon dont la surface terrestre réfléchit la lumière solaire et libère de la chaleur. En général, le sol nu labouré absorbe davantage de lumière solaire que le couvert forestier; il en va de même pour les terrains de stationnement revêtus par rapport aux prairies. Par ailleurs, les déserts créés par le déboisement et le surpâturage réfléchissent davantage de lumière solaire que les arbres et les prairies qu'ils remplacent. Tous ces changements peuvent aussi modifier les configurations régionales de l'évaporation, du ruissellement et des pluies. Bien qu'ils puissent avoir une influence locale importante, ces changements n'auront probablement pas, dans la majorité des cas, d'effet notable sur le climat de la planète.

Les aérosols atmosphériques. Du fait de ses activités tant agricoles qu'industrielles, l'humanité ajoute à l'atmosphère de grandes quantités de fines particules appelées aérosols. Presque tous les aérosols sont rapidement entraînés par la gravité et les précipitations, mais ils n'en influent pas moins sur le bilan radiatif de l'atmosphère. C'est la quantité et la nature des particules tout comme la nature de la surface terrestre ou marine située en dessous qui déterminent si cet effet ira ou non dans le sens de la tendance au réchauffement. Les effets régionaux peuvent néanmoins être importants, particulièrement si l'on tient compte des grandes quantités de sulfates et d'autres aérosols supplémentaires provenant de l'utilisation de combustibles fossiles et du brûlage de la biomasse. Récemment, les scientifiques ont avancé que les concentrations élevées de ces aérosols, particulièrement dans l'hémisphère Nord, pouvaient réduire notablement le réchauffement solaire dans ces régions, tant en réfléchissant plus de rayonnement solaire vers l'espace qu'en augmentant la réflectivité des nuages bas (les aérosols augmentant les taux de condensation dans les nuages). Ces processus ont pu atténuer temporairement l'ampleur du réchauffement hémisphérique qui pourrait se produire en raison d'un effet de serre accru. Cependant, les effets globaux nets des changements dans les aérosols ne sont pas encore bien compris.

La brume arctique. Depuis les années 1940, les observateurs de l'Arctique ont signalé la présence de plus en plus fréquente de couches de brume d'un brun rougeâtre. Cette brume, que l'on observe surtout en hiver et au printemps lorsque l'air arctique est très calme, se compose d'aérosols industriels provenant principalement de l'Europe et du nord de l'Asie, que les vents dominants transportent sur de grandes distances jusque dans l'Arctique. Ces aérosols contiennent des particules de suie et d'acide qui accentuent l'absorption et la diffusion nettes de la lumière solaire du printemps dans la basse atmosphère. Ils accroissent aussi l'absorption par la surface

de la lumière solaire à mesure qu'ils se déposent sur la neige et la glace. La brume peut causer un léger réchauffement des températures printanières arctiques, auquel cas il pourrait aussi y avoir des changements dans la configuration des vents de l'hémisphère.

Les îlots thermiques urbains. Le milieu urbain est très différent du milieu rural dont il prend la place. Les bâtiments et les véhicules rejettent directement la chaleur dans l'air, tandis que la pollution atmosphérique et les surfaces sombres des rues et des toits accentuent l'absorption de la lumière solaire. Les constructions peuvent aussi modifier le flux de vent : la vitesse augmente entre les grands immeubles mais peut aussi tomber à zéro du côté abrité. Il en résulte que les villes sont nettement plus chaudes que la campagne environnante, surtout l'hiver. Ainsi, en moyenne, la température au centre de Toronto est d'environ 3 °C plus élevée qu'en banlieue. Toutefois, l'effet est strictement local. Même si tous les îlots thermiques urbains du monde étaient réunis, leur influence sur les conditions climatiques du globe ne serait pas significative.

Les détournements et le stockage de l'eau. L'eau emmagasinée dans un lac ou s'écoulant dans un cours d'eau constitue une source d'humidité pour l'air qui se trouve au-dessus de la masse d'eau et un important moyen d'accumuler la chaleur. Les lacs et cours d'eau ont pour effet de rafraîchir le climat local en été et de le réchauffer en hiver. Les projets à grande échelle visant à retenir ou à détourner les eaux peuvent par conséquent exercer une influence notable sur les climats régionaux.

Chapitre 3

La prévision du changement climatique

Tout grand changement climatique entraîne inéluctablement un risque de transformation radicale de l'écosystème mondial. Si une telle transformation avait lieu, les sociétés humaines seraient confrontées à des bouleversements physiques, sociaux et économiques qui dépasseraient tout ce que le monde a connu jusqu'à ce jour, et elles seraient forcées d'y faire face. C'est pourquoi il est d'une importance cruciale de savoir quels changements seraient à craindre et quelles en seraient les conséquences. Cependant, étant donné la complexité du système climatique de la Terre, peut-on vraiment prévoir ces changements avec un degré acceptable de certitude?

Le système climatique mondial met en jeu des processus et des interactions qui sont malheureusement trop complexes et d'une trop grande portée pour qu'on les reproduise en laboratoire. De plus, l'étude des systèmes climatiques d'autres planètes comme Mars et Vénus n'est pas d'une grande utilité puisqu'on n'y trouve ni océans ni biosphère terrestre.

En étudiant le climat passé de la Terre, on peut recueillir beaucoup d'informations sur son évolution et entrevoir les causes possibles de changement, mais cela ne nous éclaire pas sur les processus physiques en cause. À partir des tendances des climats connus, on ne peut pas non plus extrapoler le futur, surtout quand on considère que les forces intervenant dans les changements à venir peuvent être extrêmement différentes de celles du passé.

Heureusement, par contre, la plupart des processus, interactions et changements particuliers qui font partie du système climatique peuvent s'exprimer en termes de relations statistiques et de lois physiques bien définies, comme la loi de la conservation de la masse et de l'énergie et les lois du mouvement de Newton. Ces relations physiques peuvent se traduire en expressions mathématiques et, à l'aide d'ordinateurs de haut niveau, servir à calculer la réaction du climat aux forces de changement.

À l'heure actuelle, on fait beaucoup appel à ces modèles mathématiques pour étudier les effets qu'ont sur le climat des phénomènes courants comme les éruptions volcaniques et les anomalies de température de l'océan. Les modèles permettent aussi de parfaire nos connaissances des phénomènes climatiques passés et de simuler les réactions possibles du système climatique à de grands bouleversements, comme une guerre nucléaire ou l'amplification de l'effet de serre.

Les modèles mathématiques du climat

Les techniques mathématiques et les capacités informatiques étant limitées, il est impossible de reproduire en détail tous les processus participant au système climatique. Les modélisateurs doivent donc leur appliquer des simplifications et des approximations, estimer lesquels ont le plus d'importance et lesquels sont le moins touchés par ces modifications. On peut élaborer bien des sortes de modèles. La nature de chacun dépend de l'application à laquelle on le destine, des simplifications nécessaires et de la précision spatiale et temporelle désirée.

Un modèle climatique extrêmement simple est celui qui réduit la température de la Terre à une moyenne globale en un seul point. Il peut servir à calculer la température moyenne de la surface de la Terre comme équilibre énergétique découlant des propriétés de l'atmosphère de la planète en termes de réflectivité et d'effet de serre.

À l'autre extrême, on trouve les modèles de circulation générale (MCG) très complexes et très évolués, qui font intervenir les lois physiques de conservation de la quantité de mouvement, de la masse, de l'humidité et de l'énergie, et qui donnent une représentation tridimensionnelle très détaillée des océans et de l'atmosphère. Ils peuvent simuler la manière dont les différents paramètres du climat (température, humidité, direction et vitesse du vent, teneur du sol en humidité et nombres d'autres encore) évolueront dans le temps en n'importe quel point du globe à mesure que diverses conditions sont modifiées.

Entre les deux se trouve une vaste gamme de modèles à une ou deux dimensions que l'on utilise pour étudier, avec divers degrés de complexité, les différents processus et interactions en cause dans le climat. Ces modèles permettent d'étudier efficacement un bon nombre de relations climatiques à petite échelle, et les informations que l'on en tire sont utiles pour l'amélioration des équations employées dans les MCG.

Cependant, même le MCG le plus complexe n'est en réalité qu'une description très sommaire du système climatique réel. Bien que le modèle effectue des calculs pour des dizaines de milliers de points de l'atmosphère et des océans et qu'il

Le modèle canadien de circulation générale

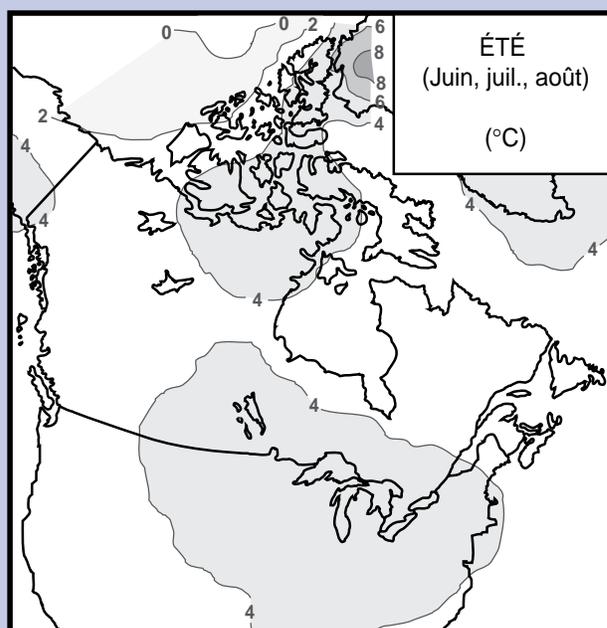
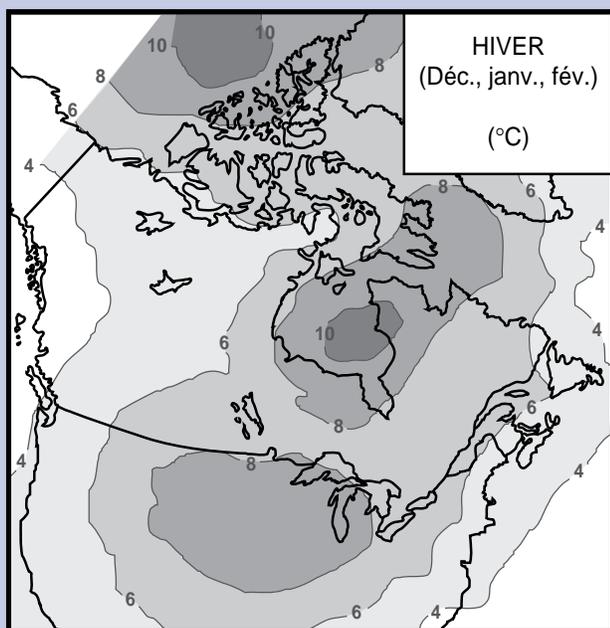
Un des MCG les plus perfectionnés à l'essai de nos jours a été élaboré par un groupe de chercheurs du Centre climatologique canadien à Toronto. Il comporte certaines améliorations par rapport aux MCG utilisés par d'autres groupes pour des expériences antérieures sur la modélisation du climat. En particulier, sa résolution spatiale est plus élevée (d'où une grille plus fine) que celle des précédents MCG, ce qui donne une couverture d'information deux fois plus grande et permet de représenter avec beaucoup plus de détails les processus climatiques locaux. De même, il simule beaucoup mieux les propriétés de réflexion et d'absorption des nuages, le réchauffement solaire annuel et quotidien, la température des océans et les limites des glaces. Par contre, pas plus que les autres modèles, il ne dispose d'un océan en circulation parfaitement interactif.

La première grande expérience effectuée avec ce modèle, une étude des effets qu'aurait sur le climat un doublement de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone, s'est terminée à la fin de 1989. Malgré les améliorations apportées à la conception du modèle, les résultats de cette expérience restent assez similaires à ceux des entreprises antérieures de simulation du réchauffement du globe. Par exemple, le groupe canadien a obtenu une projection d'un réchauffement planétaire net en surface de 3,5 °C, à peu près au milieu de la gamme trouvée par les

autres modélisateurs. De même, bien que sa prévision d'une augmentation de 3,8 % de la moyenne de l'évaporation et des précipitations à l'échelle de la planète soit nettement inférieure à celles des autres groupes (de 7,1 à 15,8 %), elle n'en indique pas moins la même tendance.

Pour ce qui est du Canada, le MCG canadien montre un réchauffement de 4 à 8 °C dans le Sud, avec peu de variation d'une saison à l'autre. Dans le Nord, le réchauffement atteint 8 à 12 °C en hiver, mais il se situe entre 0 et 6 °C en été. L'évaporation augmentant plus que les précipitations, la disponibilité de l'humidité du sol diminue en toute saison dans la plus grande partie du pays, la baisse étant plus marquée (plus de 20 %) dans la région du centre-sud. On constate une nette augmentation de l'approvisionnement en eau au Yukon en été, de même que dans la quasi-totalité de l'Arctique et le long de la côte Ouest en hiver.

Les modélisateurs canadiens sont à mettre au point un MCG évolué qui permettra d'améliorer plusieurs éléments du modèle actuel et qui comportera de nouvelles capacités. Ces améliorations comprennent un océan à circulation complète, la chimie de l'atmosphère et de meilleures simulations des interactions air-terre.



résolve pour cela 200 000 équations ou plus, ces simulations ne décrivent pas totalement les caractéristiques et processus climatiques dans l'espace et dans le temps.

Un MCG typique divise la surface de la Terre en une grille, ou série de rectangles. Les premiers modèles, à basse résolution, utilisaient des rectangles assez gros, qui couvraient chacun une superficie de 640 000 km², soit environ celle du Manitoba. Les modèles modernes de la plus haute résolution font appel à des rectangles d'environ 90 000 km², soit à peu près 20 % de plus que la superficie du Nouveau-Brunswick. Dans le plan vertical, l'atmosphère peut être représentée par deux à quinze couches, selon la résolution du modèle.

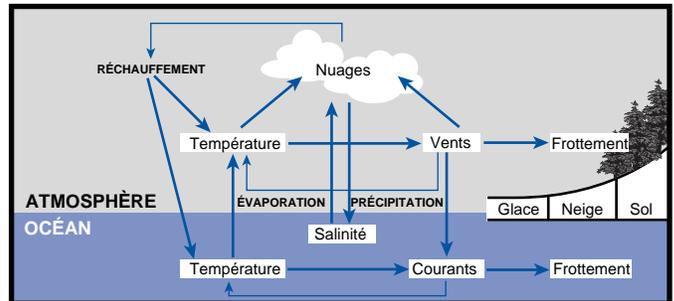
Néanmoins, un grand nombre d'importants processus climatiques se déroulent à des échelles beaucoup plus petites que celle du plus petit rectangle; il faut donc les traiter en bloc plutôt qu'individuellement. On en fixe les valeurs par le procédé de paramétrisation. Cette opération suppose l'établissement de relations statistiques entre ces processus et de variables à grande échelle que peut manipuler le modèle. Parmi les processus et variables qui doivent être paramétrés, on compte l'évaporation, les précipitations et les caractéristiques des nuages et de la surface du sol. Les modèles doivent aussi tenir compte des mécanismes complexes de rétroaction qui jouent entre les divers processus.

La figure 21 présente une description très simplifiée des éléments qui sont typiquement inclus dans un MCG. L'incertitude qui plane sur la meilleure façon de représenter ces processus et rétroactions est une des grandes raisons pour lesquelles différents modèles peuvent diverger considérablement sur les conséquences d'un même changement imposé au système; c'est aussi pourquoi on ne peut pas encore considérer les résultats des expériences faites avec ces modèles comme des prédicteurs fiables des climats futurs.

Bien sûr, la meilleure façon de savoir si un modèle peut vraiment simuler la réalité, c'est en définitive de vérifier s'il peut reproduire des changements qui sont déjà survenus. Par exemple, on peut lui faire simuler le climat actuel. Si les résultats s'écartent beaucoup des données d'observation, on devra conclure que le modèle ne sera pas plus valide pour d'autres expériences. La plupart des MCG présentement utilisés dans l'étude du changement climatique simulent assez bien les climats actuels. Aucun d'entre eux, par contre, ne peut être considéré comme d'une haute précision, surtout en ce qui concerne les climats régionaux, même si certains sont plus satisfaisants que d'autres.

Grâce aux MCG, l'évolution probable du climat est maintenant beaucoup mieux comprise mais pas totalement, et

Figure 21
Principaux éléments d'un modèle de circulation générale



SOURCE : Adapté de Gates, 1985.

bien des aspects du changement climatique à venir restent douteux. Les scientifiques sont convaincus que la réponse à ces questions passe par le recours à des ordinateurs beaucoup plus puissants, qui ne sont pas encore au point, et par une meilleure compréhension de certains des processus physiques du climat. Ces progrès scientifiques pourraient cependant exiger au moins une autre décennie de recherches.

Les résultats des expériences avec les modèles

Que ressort-il des expériences effectuées au moyen des MCG sur le genre de climat que pourrait causer l'amplification de l'effet de serre?

L'expérience la plus courante (effectuée plusieurs fois avec un bon nombre de modèles différents) simule une atmosphère dans laquelle la concentration de dioxyde de carbone est le double de celle de l'ère préindustrielle. On n'a pas toujours obtenu des résultats cohérents d'une expérience à l'autre, mais il en est cependant ressorti certains points communs (tableau 2). Parmi les conclusions les plus fiables, celles qui suivent sont considérées comme les plus importantes :

- Le doublement de la concentration de dioxyde de carbone entraînera un réchauffement moyen considérable (1,5 à 4,5 °C) de la température de surface du globe, qui dépassera probablement tout ce qu'a connu l'humanité.
- Ce réchauffement sera nettement plus marqué dans les régions polaires en hiver et sera plus grand au-dessus des terres que des océans.
- On constatera une augmentation des taux moyens de précipitation et d'évaporation à l'échelle de la planète. Il est très probable que la teneur en humidité des sols en été

Tableau 2**Résultats des expériences en fonction d'un doublement de la teneur en dioxyde de carbone**

Facteur climatique	Nature du changement	Concordance
Température mondiale	– Au moins 1°C de plus – Réchauffement plus grand vers les pôles – Environ 3 °C de plus	– Élevée – Élevée – Moyenne
Température locale	– Varie avec l'endroit	– Peu élevée pour des endroits précis
Précipitations et évaporation mondiales	– Augmentation légère à modérée – Grandeur de l'augmentation	– Élevée – Peu élevée (prévisions variant de 3 à 15 %)
Précipitations locales	– Varie avec l'endroit	– Peu élevée pour des endroits précis
Humidité du sol	– Été plus sec aux latitudes moyennes	– Moyenne à peu élevée

SOURCE : Centre climatologique canadien.

sera plus basse aux latitudes moyennes de l'hémisphère Nord et que les régions polaires connaîtront des hivers généralement plus humides.

Par contre, certains autres aspects du climat futur ont été plus difficiles à prévoir, notamment la répartition des précipitations, qui est déterminée en grande partie par la trajectoire des perturbations. Or, cette trajectoire dépend de configurations de circulation extrêmement complexes que les MCG ne peuvent pas reproduire avec suffisamment de détail. On ne peut donc pas se fier totalement aux prévisions des MCG sur les modifications des trajectoires de perturbations, ni à celles des configurations locales des précipitations. Il n'en est pas moins évident qu'il y aura de grands changements dans la répartition des précipitations d'un endroit à l'autre. De plus, à mesure que certaines régions deviendront plus sèches et d'autres plus humides, les conditions climatiques régissant la croissance naturelle de la végétation dans le monde seront profondément modifiées.

Une autre insuffisance des expériences actuelles avec les MCG en fonction d'un doublement de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone tient à ce que les MCG ne peuvent pas encore décrire avec précision de quelle manière le système climatique réagira dans le temps à des augmentations graduelles ou transitoires du dioxyde de carbone. Pour simuler les changements qui se produiraient pendant que le dioxyde de carbone atmosphérique augmente jusqu'au double de sa teneur, les modélisateurs doivent prendre en compte l'effet

« retardateur » des océans, qui absorberont une partie de la chaleur supplémentaire de l'atmosphère. Les modèles simples des réactions transitoires laissent penser que les océans peuvent retarder de quelques dizaines d'années, voire d'un grand nombre de décennies, le plein impact de l'amplification de l'effet de serre. Des expériences plus complexes sur ces réactions transitoires à l'aide des MCG sont en cours. Même si les résultats préliminaires montrent que certaines régions océaniques se réchaufferont plus lentement par suite des changements dans la circulation océanique, ils confirment généralement ce qui a été établi au cours des expériences en fonction d'un doublement de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone. Il faudra encore une dizaine d'années avant que ces résultats puissent être acceptés en toute confiance.

Les MCG donnent une idée des effets d'une augmentation des concentrations de dioxyde de carbone (ou des effets équivalents résultant de l'augmentation d'autres gaz à effet de serre), mais il y a bien d'autres facteurs qu'ils ne prennent pas en considération. Des forces naturelles comme d'importantes éruptions volcaniques ou des variations du rayonnement solaire ont, par le passé, influé sur le climat et continueront d'avoir un effet dans les décennies et les siècles à venir. À certains moments, ces forces pourront causer un réchauffement encore plus rapide; à d'autres, elles pourront ralentir ou même renverser le processus.

Certaines activités humaines, en plus de celles qui amplifient déjà l'effet de serre, pourront aussi avoir leur

importance. Les nouvelles utilisations des terres, la quantité accrue de particules fines dans l'atmosphère, les polluants atmosphériques dans l'Arctique et les détournements d'eau à grande échelle sont autant de facteurs qui peuvent avoir des effets climatiques locaux et même, dans certains cas, planétaires. Les meilleures estimations scientifiques indiquent cependant que, au cours du prochain siècle, le climat de la Terre sera plus marqué par l'amplification de l'effet de serre que par tous les autres facteurs pris ensemble.

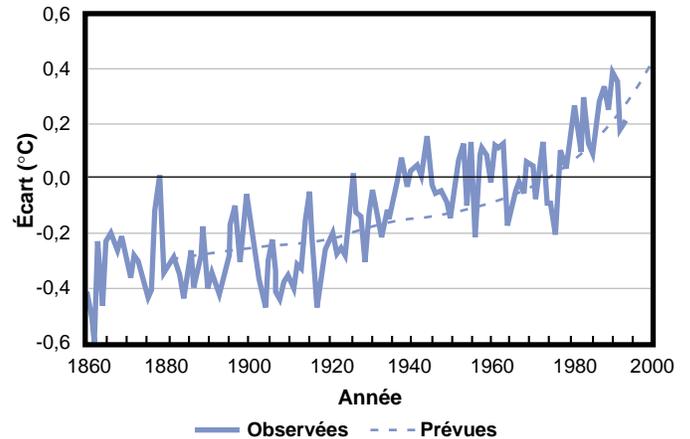
La Terre se réchauffe-t-elle?

D'après les modèles climatiques simples, l'humanité a libéré dans l'atmosphère, au cours des 200 dernières années, assez de gaz à effet de serre pour faire monter de 1 à 2 °C la température moyenne de la planète. Cependant, tout comme une chaudière, le système climatique de la Terre, avec ses océans profonds et ses pôles glacés, réagit lentement à ces changements. Compte tenu de cet effet modérateur, les scientifiques estiment que la température moyenne de la Terre aurait déjà dû augmenter de 0,4 à 1,3 °C dans les 100 dernières années.

Y a-t-il vraiment eu une hausse de température de cet ordre? La réponse est oui, mais tout juste. La figure 22 montre qu'au cours des 100 dernières années, les températures du globe se sont élevées d'environ 0,5 °C, soit un peu au-dessus de l'extrémité inférieure de la gamme prévue. Toutefois, les modélisations qui incluent les effets possibles de concentrations accrues d'aérosols sulfatés dans les régions industrielles de l'hémisphère Nord présentent une concordance nettement plus marquée de leurs prévisions avec les changements de température observés.

Cela suffit-il à confirmer que l'amplification de l'effet de serre influe déjà sur le climat mondial? Certains scientifiques avancent que oui, mais la plupart s'accordent à dire qu'il est trop tôt pour tirer des conclusions formelles. La tendance des températures des 100 dernières années, quoique conforme aux prévisions d'un réchauffement attribuable à l'effet de serre, reste néanmoins dans les limites des fluctuations naturelles que le climat a connues depuis 1 000 ans et pourrait donc s'expliquer par des causes strictement naturelles. Il faudrait que la température mondiale continue de monter pendant encore au moins 10 ans pour que l'on puisse dire avec certitude que le climat de la Terre a commencé à réagir à l'amplification de l'effet de serre.

Figure 22
Tendances des températures mondiales
prévues par les modèles et observées



SOURCE : Données fournies par l'United Kingdom Meteorological Office, 1994.

Les augmentations de la température mondiale au cours des 100 dernières années suivent une tendance très semblable aux prévisions des MCG quant aux effets d'une augmentation des gaz à effet de serre et des aérosols. La ligne correspondant à 0,0° représente la température annuelle moyenne mondiale de 1950–1979.

Chapitre 4

Une planète plus chaude

L'aire de répartition des espèces vivantes est régie par des conditions climatiques données; si ces conditions sont inadéquates, les espèces ne peuvent prospérer ou risquent de disparaître. La température de l'air et du sol, la nature, l'abondance et la variabilité des précipitations, la force du vent, la quantité de rayonnement solaire et d'autres facteurs climatiques déterminent quelles espèces occuperont une région donnée. Les grandes différences observées entre les nombreuses zones de végétation — de la toundra et de la forêt boréale aux prairies et à la forêt ombrophile tropicale — et la diversité de ces zones témoignent de l'importance du climat dans la répartition des espèces. Chaque région peut être considérée comme une entité écologique distincte, ou écozone, dont les caractéristiques sont largement tributaires de l'écoclimat qui lui est propre et dont dépend la survie des espèces présentes.

Quand les climats locaux et régionaux changent, comme cela s'est souvent produit dans le passé, les limites des écozones changent aussi, donnant lieu à des ajustements au sein des écosystèmes. Les espèces qui ne sont pas adaptées à ces nouvelles conditions migrent vers de nouvelles régions ou disparaissent, tandis que d'autres, autrefois absentes, y apparaissent. Le changement climatique provoque la migration tant des plantes que des animaux. Si les changements sont graduels, les perturbations seront très peu importantes. S'ils sont brusques, la transformation peut être spectaculaire et entraîner la disparition de certaines espèces.

Les sociétés humaines, comme les écosystèmes naturels, sont adaptées aux caractéristiques climatiques régionales. Notre mode de vie, notre adaptabilité, notre culture, notre économie et, surtout, nos sources d'alimentation dépendent en partie du climat. Dans le passé, les populations ont appris à réagir et à s'adapter à des fluctuations climatiques qui s'étendaient sur de longues périodes. Dans certains cas, ces fluctuations ont été le moteur de l'avancement social et technologique. Dans d'autres, les populations qui n'ont pas pu s'adapter ont dû faire face à l'adversité et même à des catastrophes.

Comme il se pourrait que, d'ici 20 ou 30 ans, les températures à la surface de la Terre s'élèvent à des sommets jamais atteints au cours des 10 000 dernières années, on ne peut vraiment compter sur les données historiques pour prévoir les effets d'un changement climatique futur. Comment peut-on alors se faire une idée des effets de modifications si rapides et si vastes sur les écosystèmes naturels et les sociétés humaines?

Les projections obtenues au moyen des modèles climatiques sont encore trop incertaines pour que l'on puisse prévoir avec précision les effets locaux du changement climatique sur la végétation ou les menaces qui pèsent sur la santé et le bien-être des humains. Cependant, ces modèles fournissent les éléments nécessaires à l'élaboration de scénarios plausibles permettant d'évaluer les effets de ce changement sur la nature et la société. De nombreuses études comportant la mise à l'essai de diverses hypothèses ont été menées récemment par des scientifiques. Les résultats de ces études, combinés à ceux des recherches sur les effets des changements climatiques antérieurs, fournissent d'importants indices pour repérer les écosystèmes et les secteurs de la société les plus vulnérables et ceux qui peuvent le mieux s'adapter ou qui sont le moins sensibles au changement. Bien que ces résultats doivent être considérés avec prudence, ils brossent tout de même un tableau des éventuelles conséquences du changement climatique pour la nature et les sociétés humaines du monde entier et, en particulier, du Canada.

Les écosystèmes naturels

Sur les continents, les écosystèmes naturels, et particulièrement les forêts, seront probablement les plus touchés par le réchauffement climatique. Si les changements sont lents (moins de 0,1 °C tous les 10 ans), leurs effets se feront sentir dans les régions limitrophes plus chaudes et plus sèches de ces écosystèmes, lesquels arriveront généralement à s'adapter par le biais de la migration de leurs espèces au rythme du changement climatique, comme cela s'est produit dans le passé. Sous les latitudes élevées, par exemple, les limites de différentes écozones forestières se déplaceraient graduellement vers les pôles, au rythme d'environ 100 km pour chaque augmentation de 1 °C de la température. Par contre, si le réchauffement est plus brusque (soit de l'ordre de 0,5 °C tous les 10 ans), le succès de la reproduction de la plupart des espèces diminuerait rapidement et les taux de mortalité augmenteraient. Ces espèces dépériraient à une vitesse telle qu'elles n'auraient pas le temps de s'adapter aux nouvelles conditions ni de migrer vers un environnement qui leur serait plus favorable.

L'agriculture

Le dioxyde de carbone étant une substance nutritive pour les plantes, une hausse de sa concentration dans l'atmosphère a

probablement un effet positif sur la croissance de la plupart des plantes, du moins de celles cultivées dans des conditions contrôlées. Non seulement le dioxyde de carbone favorise-t-il la croissance des plantes, mais il peut aussi leur permettre d'utiliser l'eau plus efficacement, augmentant ainsi leur tolérance à la sécheresse. Ces effets varient avec les espèces. Des plantes comme le maïs et la canne à sucre réagissent très peu à une augmentation de la concentration de dioxyde de carbone. D'autres, dont le blé et le riz, voient leur rythme de croissance augmenter considérablement. Malheureusement, c'est aussi le cas d'un grand nombre de mauvaises herbes. Par ailleurs, on ne connaît pas encore très bien les effets d'une teneur atmosphérique accrue en dioxyde de carbone sur la végétation des milieux naturels, où de nombreuses espèces se disputent l'espace nécessaire à leur croissance. On ne sait pas non plus avec certitude si les plantes qui ont poussé dans une atmosphère enrichie en dioxyde de carbone sont aussi nutritives.

Les effets du réchauffement climatique sur la production alimentaire mondiale seront variables. Ils dépendront largement de l'évolution des configurations des précipitations régionales; toutefois, pour le moment, on ne peut prévoir avec précision la répartition, l'intensité et la variabilité futures des précipitations. Sous les hautes latitudes, comme dans certaines régions nordiques du Canada, de la Scandinavie et de la Russie, le réchauffement climatique devrait favoriser la croissance des plantes et permettre l'extension de l'agriculture dans des régions où les sols sont cultivables, mais où pour l'instant le climat n'est pas favorable.

Sous les latitudes moyennes, comme dans le sud du Canada, la productivité agricole de certaines régions connaîtra sans doute des changements. Là où les avantages de saisons de croissance plus chaudes et plus longues seront renforcés par une humidité accrue du sol, la productivité augmentera. Cependant, les sols d'autres régions deviendront plus secs et la productivité pourrait y être réduite. D'après les prévisions, des perturbations locales importantes pourraient toucher ces latitudes, où les conditions seront généralement plus sèches, en particulier les régions de l'intérieur du pays. Cependant, si les changements ne sont pas trop rapides, de nouvelles techniques agricoles pourraient permettre aux régions des latitudes moyennes de maintenir leur production alimentaire nette. Les probabilités accrues de phénomènes extrêmes comme les inondations, les sécheresses et les vagues de chaleur posent un problème autrement plus inquiétant. Il sera en effet difficile d'y faire face vu leur ampleur et leur imprévisibilité.

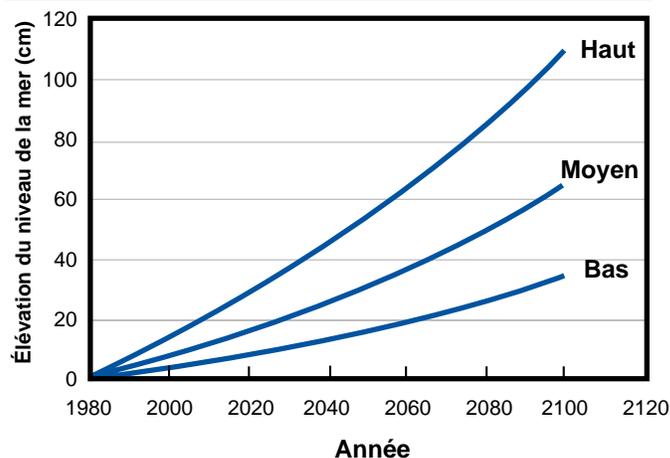
De toutes les parties du monde, les régions tropicales sont probablement les plus menacées par le réchauffement climatique. Dans la plupart de ces régions, la répartition des précipitations varie beaucoup d'une saison et d'un endroit à l'autre. L'agriculture est déjà très difficile à pratiquer à certains endroits et une légère modification du régime pluvial y a des

effets très marqués. Les projections des modèles climatiques indiquent que le réchauffement de l'atmosphère ferait augmenter les précipitations dans la plupart des régions tropicales. Cependant, les éventuels effets bénéfiques des précipitations accrues seraient annulés par l'accroissement du taux d'évaporation, particulièrement dans les zones semi-arides. De fait, il est probable que la sécheresse — et les fléaux de la malnutrition et de la famine qui l'accompagnent — y sévira encore plus durement qu'aujourd'hui. En outre, on s'attend à une hausse de la fréquence et de l'intensité des tempêtes tropicales. En s'abattant sur des régions plus étendues qu'à l'heure actuelle, elles pourraient donner lieu à des inondations et à des dommages dus au vent d'une ampleur encore plus grande.

Les régions côtières

Le niveau moyen des océans du monde a monté lentement au cours des 100 dernières années : presque 1,5 cm tous les 10 ans. Il semble que ce phénomène s'accélére avec le réchauffement climatique. Il se pourrait qu'à l'avenir, le niveau de la mer s'élève à un rythme se situant entre 3 et 10 cm par décennie. Selon les meilleures estimations actuelles, une élévation de 6 cm tous les 10 ans est considérée comme la plus probable (figure 23). Cette élévation est principalement attribuable à l'expansion thermique de l'eau de mer et à la fonte des glaces continentales. Au milieu du siècle prochain, il est probable que le niveau des océans aura monté de 35 cm, et peut-être même de 60 cm.

Figure 23
Taux estimatifs de l'élévation du niveau de la mer jusqu'en 2100



SOURCE : Adapté de Warrick et Oerlemans, 1990.

La population humaine est très vulnérable à de tels changements. Approximativement le quart de l'humanité habite des régions côtières. Ces dernières sont déjà très touchées par l'explosion démographique, la pollution, le détournement des eaux des hautes terres, les inondations et l'érosion des côtes. Actuellement, la mer empiète progressivement sur environ 70 % des plages de la planète. Une élévation importante de son niveau aggraverait sérieusement ces problèmes. Au nombre des effets néfastes auxquels on peut s'attendre, on compte :

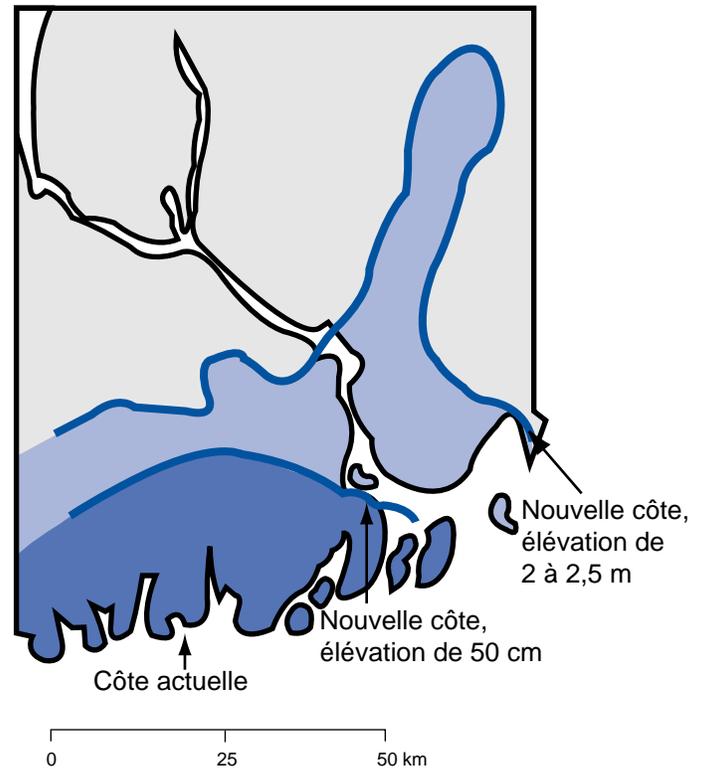
- une érosion accrue des plages et la perte de milieux humides côtiers;
- une hausse de la fréquence et de l'ampleur des inondations côtières lors des marées hautes et des marées de tempête;
- un endommagement des ouvrages côtiers, des installations portuaires et des systèmes de gestion des eaux;
- la perte de terres agricoles.

Beaucoup de pays pourront prévenir ces problèmes en construisant différentes structures comme des digues et des murs parallèles aux côtes, mais ces constructions coûteront fort cher. Ainsi, aux États-Unis, la protection complète de la côte Est contre une élévation de 1 m du niveau de l'Atlantique coûterait, a-t-on estimé, entre 10 milliards et 100 milliards de dollars. Les Pays-Bas, déjà dotés d'une infrastructure élaborée et coûteuse de protection, devraient investir des milliards de dollars supplémentaires pour se protéger contre une élévation du même ordre du niveau de la mer.

Ce sont cependant les pays dont les côtes basses sont en grande partie impossibles à protéger qui souffriront le plus de l'élévation du niveau de la mer. L'empiétement de la mer et la hauteur accrue des marées de tempête entraîneront des dommages matériels et des pertes de terres et de vies. Des pays comme les Maldives, chapelet d'îles de l'océan Indien dont le point le plus élevé n'est qu'à environ 6 m au-dessus du niveau actuel de la mer, pourraient éventuellement être rayés de la carte; d'autres, comme l'Égypte et le Bangladesh, dont la plus grande partie de la population vit dans les basses terres deltaïques, pourraient perdre une portion importante de leurs terres habitables (figure 24).

À long terme, on pense que la calotte glaciaire de l'ouest de l'Antarctique pourrait glisser dans l'océan en raison de la hausse de la température des eaux environnantes. La fonte complète de cette masse de glace entraînerait, à l'échelle de la planète, une élévation de 5 à 6 m du niveau de la mer. Ce phénomène ne devrait cependant pas se produire avant plusieurs siècles et, s'il se produisait, il prendrait des dizaines d'années.

Figure 24
Effets de l'élévation du niveau de la mer sur les côtes du Bangladesh



SOURCE : Adapté de McKay et Hengeveld, 1990.

Les autres impacts

Les impacts du changement climatique sur le niveau de la mer, l'agriculture et les écosystèmes naturels seront certes les plus sérieux pour l'humanité, mais il faut aussi s'attendre à d'autres répercussions importantes, dont les suivantes :

- des hautes latitudes moins hostiles et plus accessibles en raison de l'adoucissement des hivers et du recul des glaces vers les pôles;
- des changements dans la répartition et la productivité des organismes marins en raison de l'élévation des températures et du bouleversement des courants;
- une aggravation des problèmes dus aux maladies et aux insectes tropicaux qui se répandront ou migreront dans les latitudes moyennes au rythme du réchauffement climatique;
- une baisse de la disponibilité et de la qualité de l'eau dans beaucoup de régions;

-
- une intensification ou, dans certains cas, une réduction du stress imposé aux écosystèmes par d'autres sources de pollution;
 - le stress thermique chez les humains.

Les implications pour la sécurité de la planète

Des changements dans la production agricole, une élévation du niveau de la mer ainsi que d'autres effets directs du réchauffement climatique à l'échelle de la planète peuvent aussi entraîner un nombre de répercussions secondaires alarmantes, la plus inquiétante étant sans doute la sécurité économique et sociale mondiale.

L'accès à la nourriture et à l'eau est la préoccupation la plus fondamentale de l'humanité. Pourtant, l'effet net du réchauffement de la planète sur la production alimentaire et les ressources en eau potable reste encore incertain. Il pourrait être minime, même positif. Cependant, il est presque assuré que la répartition régionale de ces biens de première nécessité changera dramatiquement, ce qui augmentera les incertitudes présentes quant à la sécurité alimentaire et à l'hygiène publique. Ce sont les régions les plus pauvres du monde qui seront le plus touchées, étant financièrement incapables de suppléer au manque de nourriture et d'eau.

Un développement social et économique durable sera entravé par des changements environnementaux importants, surtout si ces derniers entraînent des désastres majeurs pour les populations des régions en cause. Dans le passé, de tels effets ont conduit à des guerres et à des migrations massives, et celles-ci pourraient se répéter dans le futur. À la lumière des événements survenus récemment dans le monde, il est au moins certain que les famines et autres crises environnementales exigent un transfert énorme de fonds d'aide aux pays touchés.

Dans un monde où les interconnexions sont de plus en plus nombreuses, les problèmes d'une nation concernent inévitablement toutes les nations.

Le dioxyde de carbone et les plantes

Le dioxyde de carbone n'est pas seulement un gaz à effet de serre : c'est aussi une substance nutritive pour les plantes. Par le processus de la photosynthèse, ce gaz atmosphérique est absorbé par les pores des feuilles, ou stomates, et entre dans la production de composés carbonés comme la chlorophylle et les sucres, lesquels sont emmagasinés dans les tissus des végétaux.

Des expériences de laboratoire ont montré que la croissance de la plupart des plantes est de beaucoup accélérée si l'on augmente la concentration de dioxyde de carbone jusqu'à trois fois la normale dans l'atmosphère. On a également observé que, dans de telles conditions, les plantes deviennent plus tolérantes à la sécheresse parce qu'une plus grande concentration de dioxyde de carbone provoque une fermeture partielle des stomates, réduisant ainsi le taux d'évaporation de l'eau des feuilles.

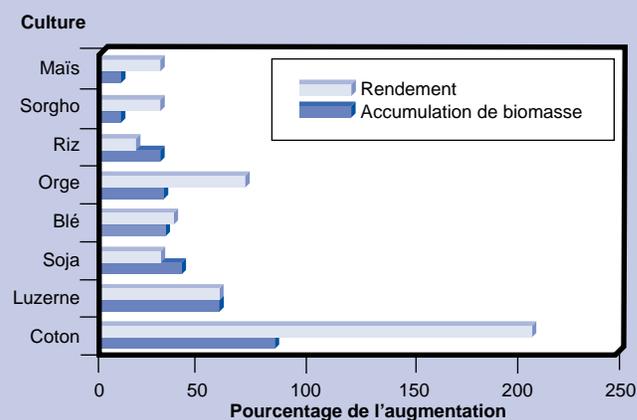
L'augmentation du taux de croissance des plantes varie cependant beaucoup d'une espèce à l'autre. Chez certaines, la fixation des molécules de dioxyde de carbone donne d'abord lieu à la formation de composés organiques comportant trois atomes de carbone. La croissance de ces plantes (connues sous le nom de plantes C_3) est grandement stimulée par un doublement de la concentration de dioxyde de carbone en laboratoire, le rendement de certaines d'entre elles augmentant de plus de 50 %. Le blé, le riz, la pomme de terre et la plupart des cultures vivrières appartiennent à cette catégorie.

Cependant, les espèces chez lesquelles la fixation du dioxyde de carbone produit d'abord des composés organiques à quatre atomes de carbone (plantes C_4) sont beaucoup moins sensibles à l'augmentation du dioxyde de carbone. La croissance et le rendement de ces plantes, dont le maïs, le sorgho, la canne à sucre et le millet — qui sont toutes des cultures vivrières tropicales importantes —, augmentent très peu lorsque la teneur en dioxyde de carbone est doublée.

On ne sait pas encore comment ces plantes réagiront à une augmentation de la concentration de dioxyde de carbone hors du laboratoire, quand interviennent bien d'autres facteurs. Dans les écosystèmes naturels, par exemple, les espèces les plus avantagées par cette augmentation supplanteront les autres. Ainsi, la

composition naturelle de beaucoup d'écosystèmes pourrait changer de façon notable. Dans les cultures, la diminution de la transpiration des plantes réduira le taux d'humidité de l'air environnant. Par conséquent, même si la tolérance à la sécheresse de la plupart des végétaux sera accrue, ces derniers seront peut-être exposés à des conditions de sécheresse plus sévères. Les mauvaises herbes poseront également des problèmes accrus, étant donné que la croissance de la plupart d'entre elles est grandement stimulée par une teneur plus élevée en dioxyde de carbone.

Enfin, des travaux de recherche récents portent à croire que l'augmentation du volume de matière végétale attribuable à la hausse des concentrations de dioxyde de carbone pourrait s'accompagner d'une réduction de la qualité nutritive des tissus végétaux, lesquels seraient alors plus riches en carbone, mais plus pauvres en azote. On a observé, par exemple, que les ravageurs devaient consommer beaucoup plus de végétaux riches en carbone pour maintenir leur taux de croissance normal.



Chapitre 5

Un Canada plus chaud

Au cours de la dernière décennie, des scientifiques œuvrant dans le cadre du Programme climatologique canadien ont effectué des évaluations préliminaires des effets possibles du changement climatique sur l'environnement, la société et l'économie. Ils ont utilisé des projections obtenues au moyen de MCG afin d'évaluer les modifications possibles des caractéristiques générales du climat. L'intégration de données climatiques historiques à ces projections leur a permis d'apprendre davantage sur la façon dont les conditions météorologiques proprement dites pourraient être modifiées et de calculer la fréquence probable des phénomènes extrêmes, comme les vagues de chaleur ou de froid et les périodes de sécheresse ou de précipitation abondante. Le texte de ce chapitre est largement fondé sur des études récentes.

Les forêts

Le territoire canadien est en grande partie couvert d'arbres allant de l'épinette noire et du bouleau des froides forêts boréales au pin et aux feuillus des forêts méridionales plus chaudes et recevant plus de précipitations. L'absence de forêt dans deux grandes régions est attribuable en partie au climat : les Prairies, dont le sol a un faible taux d'humidité, et la toundra, au nord, où les températures sont trop basses.

Vu l'abondance des ressources forestières du Canada, il n'est pas surprenant que l'industrie du bois soit la plus importante du pays. Selon Statistique Canada, les compagnies forestières, qui exploitent ces ressources pour en tirer divers produits, génèrent des revenus dépassant 45 milliards de dollars et emploient plus de 280 000 personnes. Par ailleurs, les forêts ont une grande importance sur le plan écologique. Elles fournissent les habitats nécessaires à la survie d'une multitude d'animaux sauvages, jouent un rôle important dans les processus hydrologiques et radiatifs du système climatique et renferment une grande partie du carbone organique de la planète. C'est pourquoi le maintien de leur intégrité est primordial sur le plan non seulement de l'économie du pays, mais aussi des processus naturels fondamentaux de la biosphère.

En général, l'augmentation des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone, l'allongement et le réchauffement des saisons de croissance et l'adoucissement des hivers devraient accroître considérablement la productivité

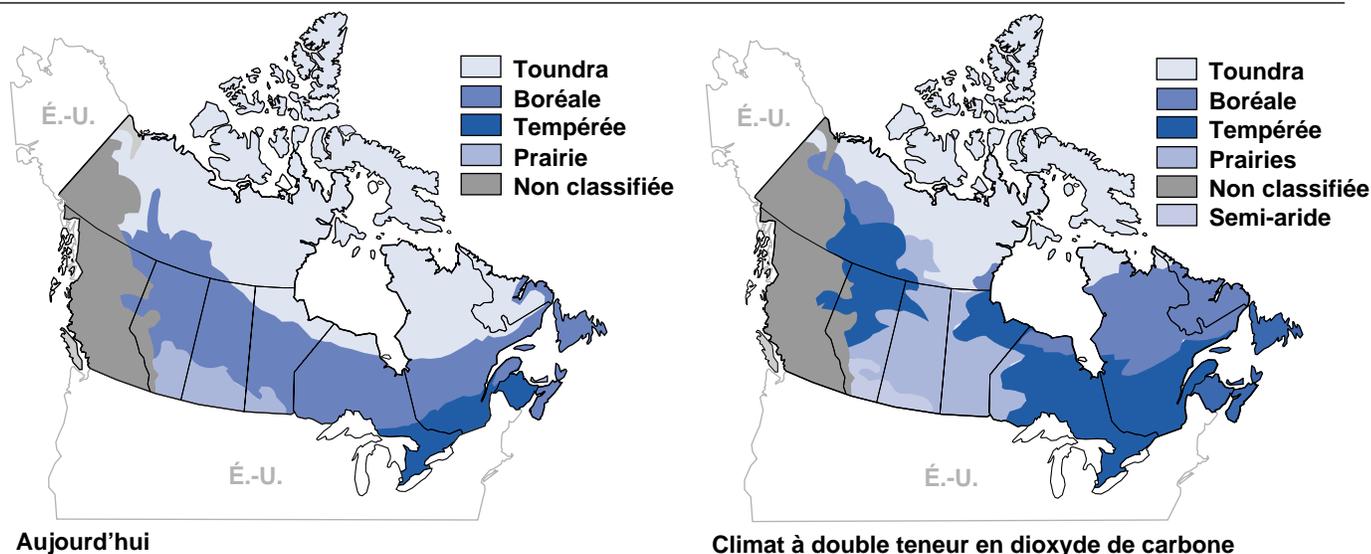
dans plusieurs régions du pays. Par exemple, selon les prévisions climatiques pour le milieu du siècle prochain, le rendement des forêts québécoises pourrait augmenter de 50 à 100 %. Cependant, les limites des différents types forestiers seront profondément modifiées (figure 25). Il en résultera une réduction de la superficie totale des forêts, surtout en raison de la baisse du taux d'humidité du sol des prairies herbeuses, qui favorisera l'expansion de ces dernières vers le nord et vers l'est.

Le territoire couvert par la forêt boréale devrait connaître les plus grands bouleversements. À leurs limites sud-est, les peuplements de feuillus et de conifères des forêts tempérées devraient progressivement s'étendre vers le nord pour remplacer l'essence dominante, l'épinette noire. Par ailleurs, l'expansion de ces limites septentrionales vers la toundra serait grandement entravée par la pauvreté des sols et la lente dégradation du pergélisol.

La gravité de ces changements dépendra dans une large mesure du rythme auquel ils se produiront. On peut s'attendre à ce que chaque hausse de température de 1 °C entraîne un déplacement des zones thermiques du Canada d'environ 100 km vers le nord. Comme plusieurs essences d'arbres ne peuvent se déplacer de plus de 700 m par année quand elles sont exposées à des changements climatiques, le remplacement rapide des essences en recul par celles qui avancent — ce qui assure des transitions en douceur d'un type forestier à un autre — ne sera possible que si le changement climatique est très graduel. Même alors, la transition d'un type forestier à un autre sera sporadique et irrégulière, la plupart des incendies de forêt étant un élément important dans le processus de remplacement des essences existantes par des nouvelles. Malheureusement, selon les modèles climatiques, les températures et les précipitations devraient changer très rapidement. Si tel est le cas, les conséquences risquent d'être graves, particulièrement le long des limites méridionales des essences, là où l'humidité du sol est peu élevée.

Les forêts exposées à des stress supplémentaires, comme ceux infligés par les dépôts acides, la pollution par l'ozone de la basse troposphère, l'accroissement du rayonnement ultraviolet et le lessivage de produits chimiques dangereux présents dans le sol, pourraient être endommagées à grande échelle. Le dépérissement récent de certains peuplements

Figure 25
Modification des limites des forêts et des prairies par suite d'un doublement de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone



SOURCE : Rizzo, 1990.

d'érables en Ontario et au Québec en est peut-être un signe avant-coureur.

Aussi, le réchauffement climatique fera apparaître dans nos forêts des maladies et des ravageurs nouveaux en provenance du Sud, augmentant ainsi les risques d'infestations et d'épidémies. De plus, l'accroissement de la quantité de biomasse morte, combinée à des étés plus secs, pourrait accroître considérablement la fréquence et l'ampleur des incendies de forêt. De fait, leur nombre s'est déjà accru au cours des années 1980 et 1990, qui ont été chaudes et sèches (figure 26). Enfin, la destruction du manteau forestier aura pour effet d'augmenter la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone, ce qui accélérera le réchauffement du globe.

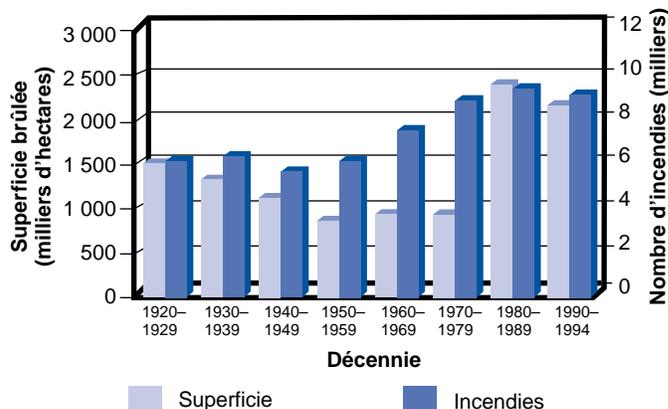
L'agriculture

Le potentiel agricole du Canada est limité, notamment, par le climat froid. Les saisons de croissance, ou périodes sans gel, ne sont que d'environ 200 jours dans la partie la plus méridionale du pays et de quelques semaines seulement dans le Grand Nord; les sols restent donc improductifs une bonne partie de l'année. De plus, la rigueur des hivers est telle que le gel peut endommager la végétation en dormance, ce qui limite l'utilisation de cultures qui passent l'hiver dans le sol, comme le blé d'hiver, dans les Prairies et dans d'autres régions soumises à un régime climatique semblable. Durant la saison de croissance, la quantité d'énergie thermique que les plantes

reçoivent est plutôt réduite, ce qui limite les taux de croissance. En raison de ces contraintes, les types de plantes agricoles cultivables sont passablement restreints, de même que le rendement et le nombre des récoltes par année.

On pourrait donc s'attendre à ce que le changement climatique soit bénéfique à l'agriculture canadienne. En effet,

Figure 26
Nombre moyen d'incendies de forêt et superficie forestière moyenne brûlée par année (par décennie)



SOURCE : Stocks, 1994.

selon les scénarios climatiques établis pour 2050, la durée des saisons de croissance des régions de Whitehorse (Yukon) et de Yellowknife (Territoires du Nord-Ouest) serait du même ordre que celle de la région d'Edmonton (Alberta) actuellement, et le Nouveau-Brunswick connaîtrait des conditions semblables à celles de la péninsule de Niagara (Ontario).

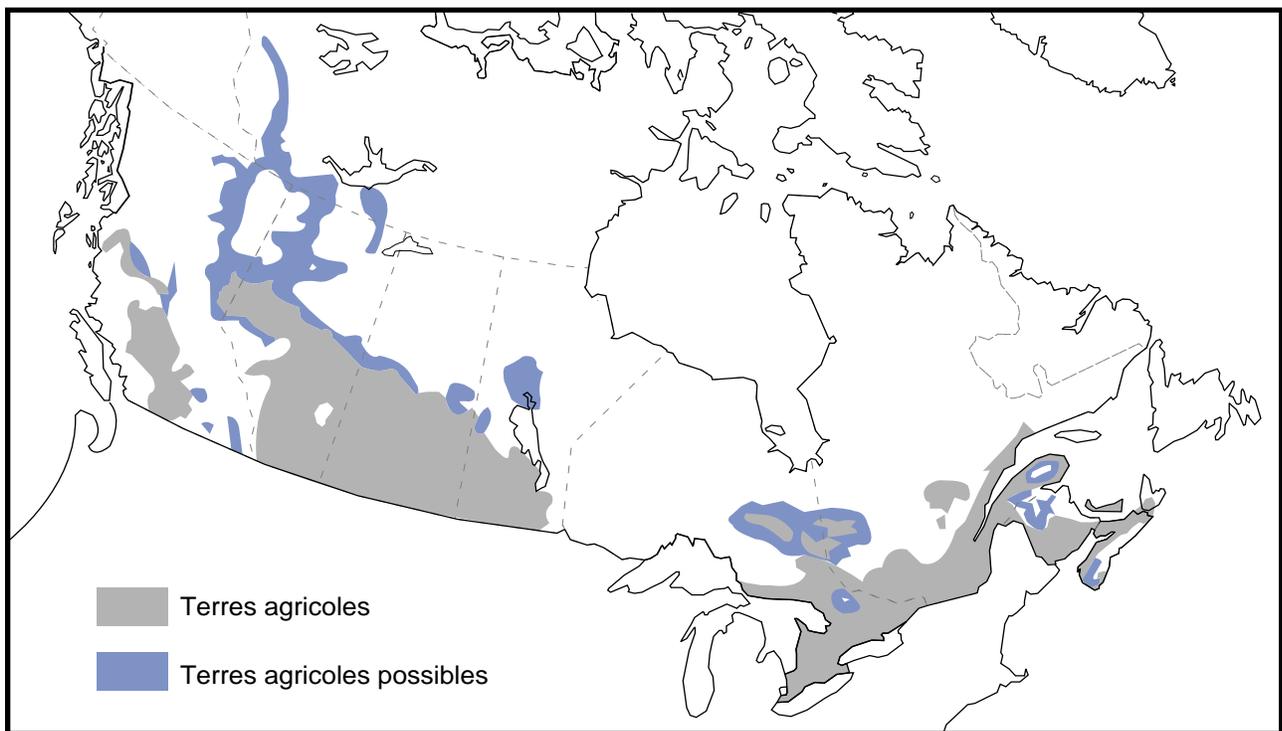
Grâce à l'élévation des températures, le potentiel de croissance de la végétation dans des régions comme le centre de l'Ontario et le sud du Québec et de la Saskatchewan augmenterait de 40 à 50 % si tous les autres facteurs, dont l'humidité du sol et les infestations d'insectes, restaient constants. Ainsi, les possibilités suivantes seraient grandement accrues : exploitation de cultures à rendement plus élevé exigeant une saison de croissance plus longue et plus chaude, cultures multiples dans les régions les plus méridionales et expansion vers le nord de l'agriculture pionnière. La culture du maïs-grain pourrait devenir importante au Manitoba et dans le nord de l'Ontario notamment, le blé d'hiver pourrait être cultivé avec succès dans les Prairies et la production de pommes et de raisins pourrait être très élevée au Québec. Par ailleurs,

comme le dioxyde de carbone est une substance nutritive essentielle à la croissance des plantes, une teneur atmosphérique accrue de ce gaz s'ajouterait à ces avantages, augmentant éventuellement la productivité des cultures de 15 %, voire plus.

Il y aurait aussi des avantages pour l'élevage, car les températures plus chaudes permettraient des périodes de fourrage plus longues et réduiraient les besoins d'engrais supplémentaire.

Malheureusement, certains autres facteurs varieront ou imposeront de nouvelles contraintes. Premièrement, l'étendue des sols potentiellement cultivables mais non exploités pour des raisons climatiques est limitée. Actuellement, ces sols ne totalisent qu'environ 10 millions d'hectares (figure 27) et une bonne part de ces derniers sont de pauvre qualité et impropres à la culture des céréales, sans compter que des peuplements forestiers de grande valeur occupent déjà certains sols convenant à l'agriculture. Les possibilités d'expansion de l'agriculture vers le nord sont donc restreintes.

Figure 27
Augmentation possible de la superficie des terres agricoles par suite du réchauffement climatique planétaire



SOURCE : Agriculture Canada.

Deuxièmement, comme les variations climatiques ont des effets sur les populations d'insectes et d'autres ravageurs de même que sur l'incidence des maladies des plantes, la probabilité d'infestations et d'épidémies graves augmentera au cours des prochaines décennies. En outre, nombre de plantes agricoles sont sensibles au stress thermique, particulièrement aux stades critiques de leur développement, et pourraient être touchées par les vagues de chaleur estivales plus nombreuses et plus implacables. Les vaches laitières sont également vulnérables au stress thermique; si les techniques agricoles ne sont pas modifiées pour atténuer ce stress, la production laitière pourrait diminuer.

Enfin, le taux d'évaporation de l'eau des plantes et du sol sera nettement accru en raison de l'élévation des températures et les réserves d'eau du sol seront grandement réduites. Dans les régions où les pluies augmenteront de façon sensible durant la saison de croissance, ces pertes seront compensées. Cependant, selon des études sur la sécheresse, les années sèches qui surviennent partout de façon normale suivant les variations climatiques annuelles seront plus nombreuses et plus marquées, même dans ces régions (figure 28).

Là où les précipitations devraient rester constantes ou diminuer, les sécheresses seront nettement plus fréquentes et plus intenses, imposant aux cultures un stress important et causant des problèmes économiques. Ce pourrait être le cas de nombreuses régions agricoles clés du Canada, dont les Prairies et le sud de l'Ontario et du Québec. De fait, la saison de croissance de 1988, où les agriculteurs de la plupart de ces régions ont perdu une bonne partie de leur récolte à cause d'une grave sécheresse, est représentative de ce que pourrait devenir le climat estival moyen du pays. De telles situations ne sont pas sans précédent au Canada, mais elles pourraient se produire plus souvent dans les décennies à venir.

Les ressources en eau

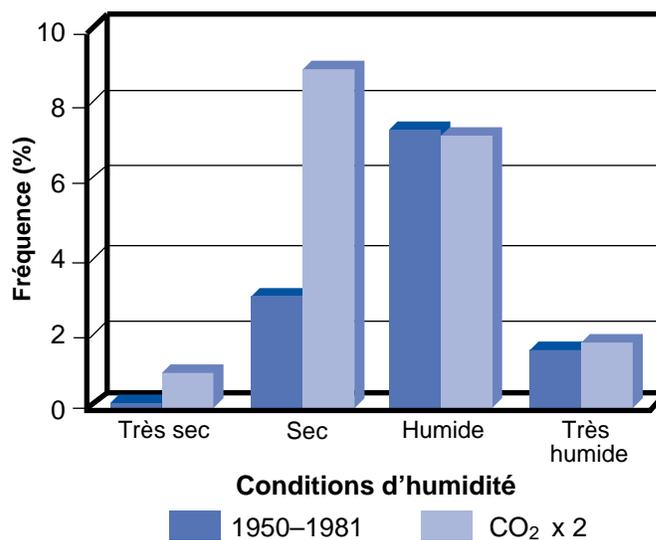
Bien que les modèles climatiques n'arrivent pas tous aux mêmes résultats en ce qui a trait aux quantités de précipitations que recevront les différentes régions du Canada, ils concordent quant aux points suivants :

- Les précipitations hivernales augmenteront probablement au Canada.
- L'hiver sera toutefois beaucoup plus court. Dans la plupart des régions, la neige sera moins abondante et la fonte et le ruissellement printaniers seront plus hâtifs, bien que les régions septentrionales puissent recevoir nettement plus de neige.
- Durant la saison de croissance, il est probable que les précipitations augmenteront dans le Nord et diminueront

ou resteront du même ordre dans le Sud, les principales trajectoires de tempêtes étant orientées vers le nord.

Ces changements auront des impacts importants sur la gestion et l'utilisation de nos ressources en eau. On sait que ce sont les averses de pluie et de neige qui alimentent, par ruissellement, les cours d'eau, mais ces précipitations ne les atteignent pas dans leur totalité : grosso modo, une partie des eaux de ruissellement s'évapore, une autre est absorbée par les plantes et une troisième est retenue par le sol. Bon nombre de nos lacs et cours d'eau tirent une grande partie de leur alimentation annuelle de la fonte printanière, quand le sol est encore gelé, la végétation en dormance et l'évaporation relativement faible. Les modifications importantes de l'accumulation de neige annuelle, du moment de la fonte et du taux d'évaporation de l'eau des plantes et du sol influenceront

Figure 28
Effets possibles du réchauffement climatique sur l'humidité du sol dans le sud de la Saskatchewan



SOURCE : Données tirées de Williams et collab., 1987.

Le diagramme montre les effets possibles du réchauffement climatique sur les conditions d'humidité du sol dans le sud de la Saskatchewan selon un scénario climatique de prévision type basée sur un doublement du CO₂. On estime que dans un tel climat, les années exceptionnellement humides seraient aussi fréquentes que maintenant. De fait, ce scénario prévoit une augmentation de 15 % des précipitations mais, malgré cela, il prévoit aussi un nombre accru d'années avec des périodes sèches ou des sécheresses importantes.

grandement sur le régime hydrique et l'état des rivières, des lacs et des réservoirs.

Bien qu'il plane encore trop d'incertitudes sur la nature et l'ampleur des modifications des régimes locaux de précipitations pour qu'il soit possible de prévoir les effets du changement climatique sur les ressources en eau des diverses régions du Canada, les simulations des modèles climatiques fournissent de précieux indices. Elles portent à croire que les ressources en eau du nord du pays seront probablement plus abondantes, mais que le ruissellement printanier sera vraisemblablement réduit et plus hâtif. Il pourrait en résulter une augmentation notable du potentiel de production hydroélectrique des bassins hydrographiques du Nord; le Nouveau-Québec, par exemple, pourrait voir sa production s'accroître de 15 % ou plus.

Cependant, il se pourrait que ces avantages soient en partie annulés par la nécessité de détourner d'importantes quantités d'eau vers les régions asséchées du sud du pays; en effet, la hausse des températures s'accompagnerait d'une augmentation de la demande d'eau puisqu'elle occasionnerait une évaporation accrue et une diminution de l'humidité du sol. Les sols plus secs retiendraient alors probablement davantage les eaux de ruissellement, dans certains cas de façon significative, ce qui diminuerait le débit des cours d'eau et abaisserait le niveau des lacs. Ces effets seraient particulièrement marqués durant les années de sécheresse.

Selon les scénarios les plus courants, le niveau de l'eau des Grands Lacs pourrait baisser en moyenne de 0,5 à 1,0 m ou plus, tandis que le débit du Saint-Laurent subirait une baisse pouvant atteindre 20 %. Quatre années sur cinq, le niveau des lacs pourrait être très bas, comme en 1963–1965 (tableau 3). En plus de réduire la qualité de l'eau, ces changements pourraient aussi accroître considérablement les coûts de navigation, peut-être de 30 %, étant donné que les gros bateaux devraient réduire leur charge pour utiliser les canaux et les voies d'eau peu profonds. Les revenus générés par les centrales hydroélectriques du sud du pays pourraient aussi subir une baisse de l'ordre de 30 à 60 millions de dollars par année. Enfin, beaucoup de milieux humides ayant une grande valeur écologique, comme ceux de la pointe Pelée sur le lac Érié, disparaîtraient en raison des conditions climatiques plus sèches.

La neige et la glace

La neige et la glace occupent une place importante dans la géographie, le climat et la culture du Canada. Elles recouvrent presque tout le territoire et la plupart des lacs et cours d'eau du pays durant au moins une partie de l'année et, dans certaines régions, toute l'année. Dans le Nord, la glace

Tableau 3
Fréquence des basses eaux dans les Grands Lacs (pourcentage d'années où le niveau de l'eau était égal ou inférieur à celui extrêmement bas de 1963–1965)

Lac	Historique (1900–1979)	Climat à double teneur en CO ₂	Doublent du CO ₂ plus utilisation accrue de l'eau
Supérieur	10	61	79
Michigan	8	57	77
Érié	5	38	77

SOURCE : Sanderson, 1987.

du pergélisol joue un rôle important dans le drainage des eaux, la croissance de la végétation et le maintien de la stabilité du sol. Les glaciers et les calottes glaciaires ont un effet important sur les climats régionaux; ils donnent naissance aux icebergs qui sillonnent la côte Est et à des îles de glace dérivant dans l'océan Arctique.

L'élévation des températures et l'augmentation prévue des précipitations hivernales entraîneront des bouleversements importants à ce chapitre. Dans le Nord, il est probable que la neige restera moins longtemps mais sera plus abondante. La période pendant laquelle les glaces recouvrent les lacs et les océans pourrait être raccourcie de plusieurs mois. Il se pourrait que la baie d'Hudson soit libre de glace toute l'année et que l'océan Arctique le soit pour ainsi dire totalement en plein cœur de l'été. Ainsi, dans les eaux de l'Arctique, la navigation et des activités hauturières comme la pêche et l'exploitation d'autres ressources seraient beaucoup plus praticables. Cependant, les scientifiques sont d'avis qu'une plus grande accumulation de neige sur les calottes glaciaires de l'Arctique et l'allongement et le réchauffement de la période de fonte sur leurs pourtours entraîneront une accélération de l'écoulement glaciaire et une augmentation du vèlage (processus de formation des icebergs) pouvant atteindre 300 %.

Dans l'intervalle, la dégradation progressive des marges méridionales du pergélisol modifiera considérablement le drainage des eaux de surface et accroîtra l'instabilité du sol. Il pourrait en résulter des dommages importants aux pipelines, voies ferrées, routes et autres ouvrages; les ponts de glace pourraient être particulièrement touchés. Construits sur des milieux humides et des lacs gelés, ces ponts constituent une précieuse voie d'approvisionnement pour de nombreuses collectivités isolées et donnent accès à de vastes régions

forestières de la forêt boréale. Un climat plus doux rendra leur construction plus difficile et réduira leur temps d'utilisation et leur force portante, vu l'épaisseur réduite de la glace. Dans certaines régions, les ponts de glace pourraient cesser de représenter des voies de transport fiable.

Plus au sud, la réduction de la couverture de glace et de neige aurait des effets maqués sur plusieurs activités. En gros, on peut dire que le secteur des transports en bénéficierait, les routes exigeant moins de déneigement et les voies d'eau devenant plus facilement et plus longtemps navigables. La plus grande partie des Grands Lacs et du golfe du Saint-Laurent serait probablement libre de glace durant toute l'année et il ne serait pour ainsi dire plus nécessaire de consacrer des millions de dollars au déneigement de grands centres urbains comme Toronto et Montréal. Cependant, la saison des sports d'hiver — ski, motoneige, pêche sur glace et patinage extérieur — serait considérablement écourtée ou, dans le cas du sud de l'Ontario, n'existerait tout simplement plus (tableau 4). Les industries connexes en souffriraient beaucoup.

L'inondation des côtes

Comme ses côtes sont accidentées, le Canada est beaucoup moins exposé aux inondations côtières que bien d'autres pays. L'élévation du niveau de la mer ne serait toutefois pas sans conséquence. Certains milieux humides côtiers, comme les basses terres de la baie d'Hudson et le delta du Mackenzie, pourraient être largement inondés. Dans d'autres régions, les eaux empièteront sur les plages et le littoral et les éroderont.

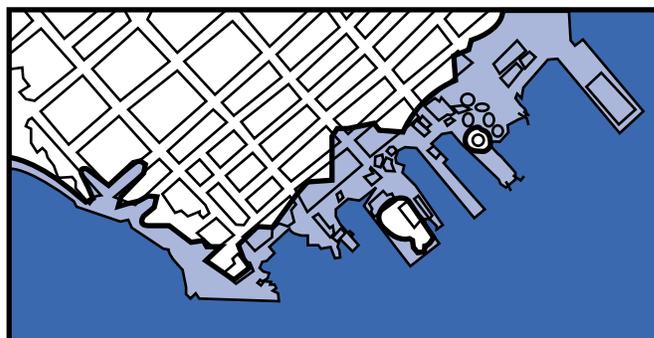
Ceux qui souffriront le plus, ce sont toutefois les résidents des agglomérations populeuses situées le long des côtes

Tableau 4
Durée de la saison de ski en Ontario et au Québec (jours)

Endroit	Climat à double	
	Climat actuel	teneur en CO ₂
Thunder Bay	131	80
Québec	109	63
Sherbrooke	87	51
Baie Georgienne, sud	70	0

SOURCE : Centre climatologique canadien.

Figure 29
Effets d'une élévation de 1 m du niveau de la mer sur les inondations à Charlottetown



SOURCE : Adapté de Lane and Associates Ltd., 1986.

L'élévation du niveau de la mer augmentera la fréquence et la rigueur des inondations dans un bon nombre de collectivités côtières. Le risque sera le plus grand au cours des marées de tempête, lorsque les marées hautes maximales seront amplifiées par de violentes tempêtes. La ligne foncée indique l'étendue d'une inondation dans le centre-ville de Charlottetown résultant d'une élévation de 1 m du niveau de la mer et d'une forte marée de tempête qui peut survenir environ une fois aux vingt ans.

atlantique et pacifique, où les habitations et les installations se trouvent presque au niveau de la mer. À mesure que les eaux monteront, on devra, pour prévenir de graves inondations dans la basse ville de Vancouver et d'autres municipalités du delta du Fraser parfois aux prises avec des inondations, investir de grosses sommes dans la construction de nouveaux ouvrages de protection ou dans l'amélioration de ceux qui existent déjà. À Charlottetown, une élévation de 1 m entraînerait à marée haute l'inondation des nouvelles constructions de la façade portuaire, tandis que les fortes marées de tempête, qui ont lieu environ tous les 20 vingt ans, seraient suffisamment hautes pour inonder de vastes parties des secteurs résidentiels et commerciaux du centre-ville (figure 29). À Saint John (Nouveau-Brunswick), les routes, les voies ferrées et les édifices du centre-ville seraient souvent inondés et les égouts déborderaient. D'autres problèmes surviendraient : contamination de l'eau potable, perte de terres agricoles et débordement accru des rivières à l'intérieur des terres pendant la fonte des neiges.

Certains de ces impacts pourraient être réduits ou accentués par le soulèvement naturel du terrain. On sait, par exemple, que la région de la baie d'Hudson subit encore un déplacement vertical, commencé depuis que les glaces de la dernière période glaciaire se sont retirées, et que son littoral

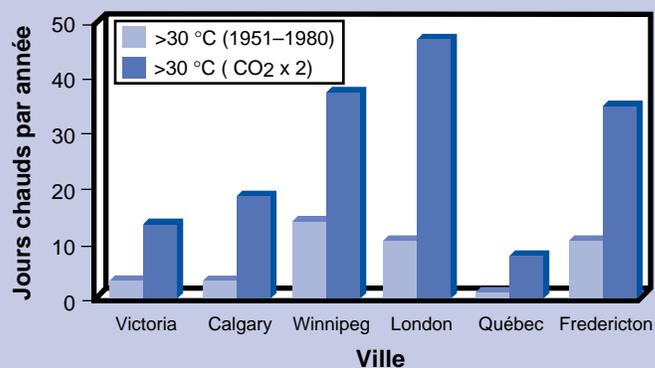
Le changement climatique et les phénomènes extrêmes

Bien que leurs résultats soient incertains, les MCG fournissent des indices raisonnablement fiables du changement probable du climat moyen à la surface du globe dans les prochaines décennies. Ce sont cependant les phénomènes extrêmes, comme les sécheresses, les inondations et les vagues de chaleur et de froid, qui sont les plus importants pour les populations humaines et les écosystèmes, étant donné qu'ils représentent de bien plus grands dangers que le changement progressif du climat. En raison de leur gravité et de leur imprévisibilité, ces phénomènes peuvent plonger les populations dans la détresse, causer des pertes économiques, entraîner d'importants bouleversements sociaux et même des décès.

La détermination de l'influence du réchauffement climatique sur la fréquence et l'ampleur des phénomènes extrêmes constitue donc une étape clé dans notre compréhension des impacts d'un effet de serre amplifié par l'activité humaine; toutefois, à ce jour, les modèles climatiques ont donné peu de résultats quant à la variabilité des climats futurs. On a cependant obtenu certains indices préliminaires à cet égard en combinant les changements moyens projetés fournis par des modèles climatiques avec des données climatiques détaillées des 30 dernières années.

Il n'est pas surprenant qu'au nombre des effets du réchauffement climatique au Canada, on compte une

augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur en été et une diminution, mais non pas une disparition complète, du nombre de périodes de temps très froid en hiver. À Saskatoon (Saskatchewan), par exemple, un doublement de la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone pourrait faire passer à huit le nombre de jours où la température dépasse 31 °C en juillet, la moyenne annuelle actuelle étant de trois. Inversement, le nombre de jours où la température est inférieure à -35 °C en janvier, qui est actuellement de trois par année en moyenne, pourrait passer à un jour aux quatre ans. Par ailleurs, même si le climat moyen du sud de la Saskatchewan devenait plus humide, les sécheresses pourraient y être deux fois plus fréquentes à cause d'une hausse du taux d'évaporation.



s'élève à un rythme comparable à celui de la hausse prévue du niveau de la mer attribuable au réchauffement climatique. Par ailleurs, la masse terrestre de la Nouvelle-Écosse s'enfonce progressivement et souffrira donc d'autant plus de toute élévation du niveau de la mer.

Les autres impacts

Comme la plupart des activités sociales et économiques sont tributaires du temps et du climat, le réchauffement climatique au Canada aura bien d'autres effets que ceux mentionnés ci-dessus. En voici quelques-uns qui sont particulièrement importants.

La consommation d'énergie. Les besoins en chauffage pour les habitations, les bureaux et les usines seront considérablement réduits en hiver. Cette baisse pourrait être

de 30 % dans les régions les plus chaudes du sud du pays et de 20 % dans le Nord, où ces besoins sont particulièrement élevés. Ces économies d'énergie seront cependant contrebalancées en partie par l'augmentation de la consommation pour la climatisation des immeubles durant l'été. De façon générale, le réchauffement climatique augmentera aussi l'efficacité des transports terrestres et maritimes et, ce faisant, réduira la consommation d'énergie de ce secteur.

Le stress thermique. Le nombre et l'intensité des vagues de froid en hiver seront considérablement réduits chaque année. Cependant, les vagues de chaleur en été seront plus fréquentes et plus intenses.

La santé humaine. Certains groupes de la population sont plus sensibles que d'autres au stress thermique, qui peut causer la maladie ou la mort, spécialement parmi les jeunes enfants et

les vieillards. Des canicules plus fréquentes accroîtraient le taux de mortalité en été, surtout lorsque la chaleur est accompagnée de masses d'air pollué. Un climat plus chaud permettrait à différentes espèces de plantes de proliférer, ce qui modifierait les quantités et les types de pollens qui touchent les personnes souffrant d'allergies. Bien des porteurs de maladies ne peuvent survivre dans notre climat hivernal; une saison froide plus courte entraînerait certaines maladies (comme la malaria) et certains parasites nuisibles pour les écosystèmes à gagner du terrain vers le nord, jusque dans la portion méridionale du Canada.

Les pêches. Les températures saisonnières déterminent en grande partie les types de poissons et d'organismes aquatiques présents dans les lacs d'eau douce, de même que leur taux de croissance. C'est pourquoi le réchauffement climatique modifiera les populations et la nature des espèces des différentes régions du Canada. De façon générale, les espèces à chair sombre, de moins grande valeur, vont être avantagées, tandis que celles à chair blanche, qui sont plus recherchées, vont connaître une réduction de leur habitat. Concurrentement, les poissons subiront d'autres stress attribuables à des changements de la qualité de l'eau et des réserves nutritives de leur habitat. Dans les eaux côtières, les modifications de la salinité, de la température et de la circulation des courants influenceront sur la répartition et l'abondance des espèces marines. La pisciculture sera probablement favorisée par un réchauffement du climat.

Il y a beaucoup plus d'incertitudes entourant les impacts sur la pêche hauturière, étant donné que celle-ci est largement tributaire des courants océaniques. Cependant, dans le passé, le réchauffement des océans a favorisé l'expansion d'espèces exotiques vers la côte du Pacifique et a eu des effets marqués sur l'abondance et la répartition de la morue le long de la côte est du Canada.

La sécurité internationale. Les effets du changement climatique dans d'autres régions du globe auront de multiples répercussions sur la sécurité économique, sociale et politique du Canada. Le commerce des denrées alimentaires, tel qu'il est pratiqué aujourd'hui, sera grandement modifié par la distribution mondiale de la production. Le Canada, autant comme exportateur que comme importateur de premier plan, devra s'adapter à ces conditions en trouvant de nouvelles sources d'approvisionnement et de nouveaux marchés.

Entre-temps, les pénuries alimentaires chroniques ou d'autres désastres dus au changement climatique dans les pays en développement augmenteront les pressions exercées sur le Canada pour qu'il fournisse de l'aide d'urgence, accueille des réfugiés de l'environnement et, peut-être, participe au

règlement de conflits armés. De plus, tout en mettant en œuvre des programmes nationaux dynamiques et probablement fort coûteux de réduction de leurs propres émissions de gaz à effet de serre, le Canada et d'autres pays industrialisés devront, pour répondre aux attentes, participer au transfert de ressources techniques et financières aux pays pauvres afin que ces derniers puissent entreprendre de tels programmes.

Chapitre 6

L'appauvrissement de la couche d'ozone

L'ozone ne représente qu'une infime fraction de l'atmosphère. Si l'on comprimait tout l'ozone en une couche de gaz pur à la température et à la pression de la surface de la Terre, son épaisseur totale ne serait que de 3 mm, soit celle de trois pièces de 10 cents empilées. Néanmoins, en raison de sa capacité d'absorber le rayonnement ultraviolet du Soleil, extrêmement dangereux pour les cellules vivantes, l'ozone est d'une importance cruciale pour la plupart des organismes vivants de la Terre. De fait, c'est l'un des principaux gaz qui absorbent les rayons ultraviolets-B (UV-B), une des plages les plus destructrices du spectre ultraviolet. En agissant comme un écran contre ce type de rayonnement, la couche d'ozone contribue au maintien de conditions adéquates à la vie dans la basse atmosphère.

L'ozone absorbe aussi le rayonnement infrarouge et contribue à la régulation du flux d'énergie thermique atmosphérique. La quantité et la répartition de ce gaz ont donc une incidence considérable sur la structure thermique de l'atmosphère et sur la circulation des courants aériens autour de la planète.

La chimie de la couche d'ozone

L'ozone n'est pas réparti uniformément dans l'atmosphère. On en trouve la plus grande partie (environ 90 %) dans la stratosphère, soit entre 10 et 40 km au-dessus de la surface de la Terre, mais principalement à environ 25 km (figure 30). Cette répartition vient de ce que le rayonnement UV lui-même joue un rôle de premier plan dans la formation de l'ozone. Dans la haute atmosphère, le rayonnement UV intense force les molécules d'oxygène à se dissocier, donnant des atomes libres d'oxygène qui se fixent ensuite à des molécules intactes d'oxygène pour former l'ozone. À mesure que les rayons UV descendent vers la surface, ils se trouvent en présence de quantités de plus en plus grandes d'oxygène et entraînent par conséquent la formation de quantités de plus en plus grandes d'ozone. Cette accumulation d'ozone finit par absorber la plus grande partie du rayonnement UV avant qu'il n'atteigne la basse atmosphère; la réaction s'estompe graduellement, laissant en place la couche d'ozone stratosphérique.

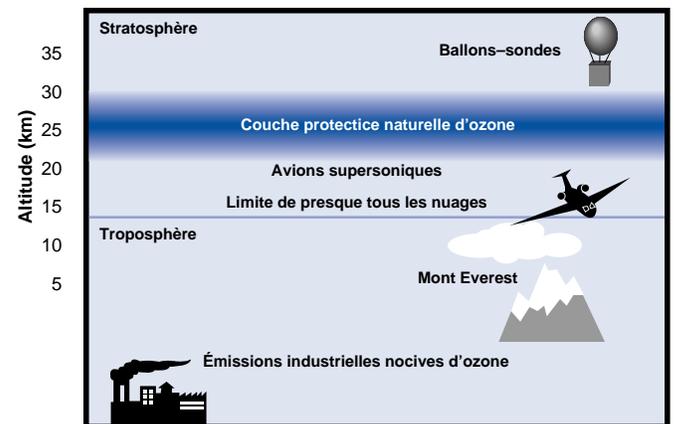
Les courants aériens, bien entendu, peuvent entraîner l'ozone vers la basse atmosphère (la troposphère), mais la plupart des molécules sont rapidement détruites au cours de

réactions chimiques avec d'autres gaz. La quantité naturelle d'ozone près de la surface de la Terre est donc plutôt minime. Comme l'ozone est nuisible tant pour les plantes que pour les animaux, sa rareté relative au niveau du sol est aussi importante à la survie sur la Terre que l'est sa plus grande abondance dans la haute atmosphère.

La quantité totale d'ozone dans l'atmosphère représente un équilibre entre la vitesse à laquelle ce gaz est produit par le rayonnement solaire et celle à laquelle il est détruit au cours de réactions photochimiques avec d'autres gaz. Ces processus sont complexes et mettent en jeu plus de 300 réactions chimiques différentes et plus de 100 types de molécules différents.

Une fois l'ozone formé dans la stratosphère, il peut être transporté dans d'autres régions par la circulation générale de l'air autour du globe. Comme ces processus photochimiques et de transport fluctuent avec la saison et avec la latitude, la quantité d'ozone varie au cours de l'année et d'une région du globe à l'autre (figure 31). Ceci a pour effet net une couche d'ozone plus mince au-dessus de l'équateur qu'au-dessus des pôles. Cependant, la quantité d'ozone en un endroit donné peut varier d'une journée à l'autre avec les changements des courants aériens dominants autour du globe.

Figure 30
Répartition verticale de l'ozone
dans l'atmosphère



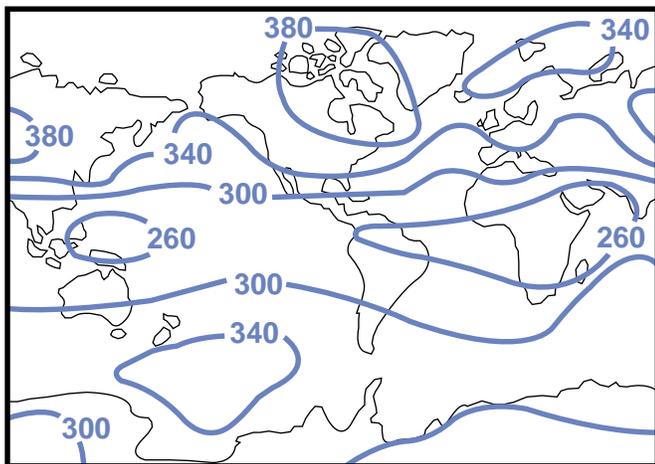
Les changements dans la couche d'ozone

On a commencé à s'inquiéter de l'état de la couche d'ozone vers le début des années 1960 en raison des essais nucléaires. Peu après, la construction de vastes flottes de transporteurs supersoniques volant à très haute altitude a fait craindre les éventuels effets destructeurs de la vapeur d'eau et des oxydes d'azote libérés par les gaz d'échappement de ces aéronefs.

En 1972, des scientifiques de la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) ont soulevé une autre préoccupation : les effets des composés chlorés qu'émettrait la navette spatiale une fois opérationnelle dans les années 1980. Il s'est avéré que ces composés n'étaient pas rejetés en quantités suffisantes pour être nocifs. Toutefois, en 1974, dans le cadre d'études de la NASA, les scientifiques ont déclaré qu'une menace semblable pourrait se matérialiser en raison des grandes quantités de chlore déjà présentes dans l'atmosphère par suite de l'utilisation des CFC.

Les CFC ont été mis au point vers 1890 et leur utilisation comme agent de remplacement de l'ammoniac en réfrigération s'est généralisée dans les années 1930, mais leurs propriétés caractéristiques en ont fait d'excellents candidats pour bien d'autres applications. Comme ils sont chimiquement inertes, non toxiques et faciles à liquéfier, les CFC sont utilisés non seulement dans les réfrigérateurs et dans les climatiseurs, mais aussi comme agents de gonflement des mousses d'emballage

Figure 31
Répartition moyenne mondiale de l'ozone naturel



SOURCE : Adapté de London et Angell, 1982.

La quantité d'ozone est mesurée en unités Dobson (UD). Ainsi, 100 UD sont égales à 1 mm d'ozone à la pression et à la température normales de la surface.

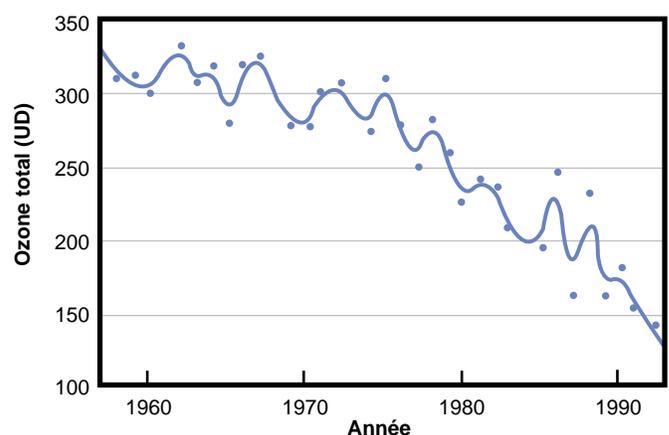
et d'isolation, comme solvants de nettoyage des plaquettes de circuits électroniques et comme propulseurs d'aérosols.

En mai 1985, des chercheurs de la *British Antarctic Survey* ont publié des données qui ont fait l'effet d'une bombe dans la communauté scientifique. Leurs observations montraient que, de septembre à la mi-novembre, la quantité d'ozone au-dessus de Halley Bay, en Antarctique, avait diminué de 40 % par rapport aux niveaux des années 1960 (figure 32). Ces découvertes étaient totalement imprévues. Aucune perte du genre n'avait jamais été relevée auparavant, ni par les instruments au sol utilisés depuis 1957, ni dans les nombreuses mesures faites par satellite depuis les années 1970. Néanmoins, les scientifiques des États-Unis et du Japon ont rapidement entrepris des recherches dans leurs propres données et confirmé la réalité du phénomène.

Ce trou dans la couche d'ozone étant indéniable, les chercheurs se sont penchés sur toute une gamme de questions connexes. Le phénomène faisait-il partie d'un cycle naturel lié à l'activité solaire? Était-il causé par des conditions météorologiques propres à la région? Comment se faisait-il que les modèles atmosphériques courants n'aient pas pu simuler ces pertes? Les réactions chimiques avec les CFC étaient-elles seules en cause ou les CFC agissaient-ils en conjonction avec d'autres substances chimiques ou d'autres conditions?

Dans cette quête d'indices scientifiques, on a rapidement déployé des efforts de recherche concertés. En 1987, les États-

Figure 32
Quantité d'ozone total au-dessus de Halley Bay, Antarctique, 1956–1993



SOURCE : Adapté du rapport du Programme des Nations Unies pour l'environnement, 1994.

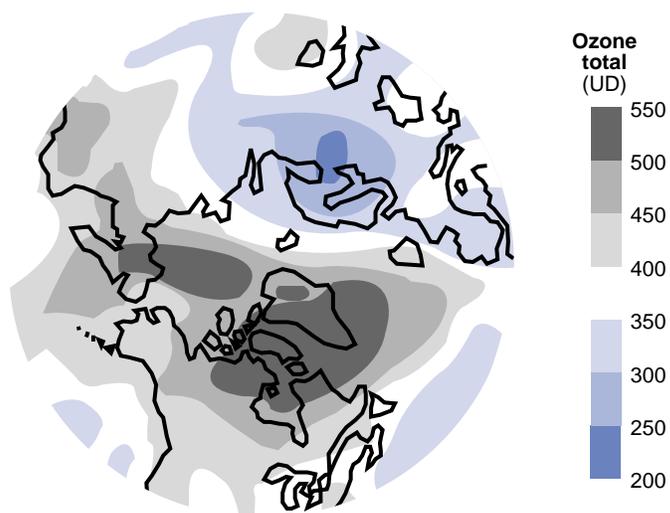
Les mesures de la quantité d'ozone total au-dessus de Halley Bay au cours du printemps de l'hémisphère Sud montrent une diminution de 50 % entre 1957 et 1993. La courbe indique la moyenne lissée des mesures annuelles.

Unis ont envoyé en Antarctique quatre équipes différentes chargées de procéder à des mesures plus poussées de l'ozone et d'autres composés chimiques au moment de la réapparition du trou en septembre. Les résultats des études de ces équipes ont montré que ni l'activité solaire ni les forces météorologiques ne permettaient, à elles seules, d'expliquer adéquatement le phénomène observé. Ils ont toutefois révélé la présence de concentrations élevées de brome et de chlore dans la basse stratosphère, à l'intérieur du vaste tourbillon atmosphérique stable qui se forme autour du pôle Sud en hiver et qui isole l'air antarctique du reste de l'atmosphère terrestre. Les études ont aussi permis d'établir que ces grandes quantités de brome et de chlore étaient liées à des processus chimiques inhabituels se déroulant dans les nuages stratosphériques polaires, lesquels se forment dans la basse stratosphère pendant les nuits extrêmement froides de l'hiver. Lorsque des formes relativement stables de chlore et de brome entrent en contact avec les particules de glace de ces nuages, il se produit une réaction qui les rend beaucoup plus destructives. Au printemps, avec le retour de la lumière solaire, ces substances chimiques très réactives entrent en interaction avec l'ozone environnant, et c'est alors que l'appauvrissement de l'ozone atteint rapidement un maximum. Le processus prend fin lorsque les températures plus chaudes provoquent la désintégration du tourbillon polaire. La formation du trou d'ozone au-dessus de l'Antarctique serait donc le résultat d'interactions complexes entre le brome et le chlore d'origine anthropique, d'une part, et les caractéristiques physiques particulières de l'atmosphère de l'Antarctique, d'autre part.

Depuis 1986, les scientifiques canadiens sont à la recherche d'indices révélant qu'un phénomène du même ordre se produit dans l'Arctique vers la fin de l'hiver. Cependant, la circulation atmosphérique étant moins stable, en hiver, au-dessus de l'Arctique que de l'Antarctique, la basse stratosphère de l'Arctique subit un plus grand mélange avec l'air des basses latitudes et n'atteint pas les températures extrêmement froides de la stratosphère antarctique. Les nuages stratosphériques polaires ne se forment donc pas aussi souvent au-dessus de l'Arctique. Bien qu'un appauvrissement de l'ozone de la basse stratosphère arctique en fin d'hiver ait été observé, il n'est pas aussi important que celui de l'Antarctique (figure 33).

On a aussi constaté que la quantité d'ozone stratosphérique diminuait dans les régions des latitudes moyennes, mais pas autant que dans les régions polaires. Dans la plus grande partie du Canada, en 1993, on a observé des valeurs minimales records, soit une réduction nette de la quantité totale d'ozone d'environ 15 % des moyennes d'avant 1980; dans certaines parties de la basse stratosphère, la réduction atteignait près de 30 %. Il semble que ces minimums soient associés aux aérosols provenant des gaz sulfurés émis dans la stratosphère par l'éruption du mont Pinatubo en juin 1991, mais la contribution de ces aérosols à la destruction de l'ozone est

Figure 33
Quantité d'ozone total au-dessus des régions septentrionales de l'hémisphère Nord en mars 1986



SOURCE : Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada.

Carte des mesures faites à partir d'instruments à bord d'un satellite. Une zone d'appauvrissement de l'ozone est visible dans le quadrant supérieur droit, au-dessus de la Russie.

encore incertaine. Au début de 1994, la quantité d'ozone au-dessus du Canada semblait s'être quelque peu rétablie par rapport à ces valeurs records, mais elle demeure sous les moyennes à long terme des mesures enregistrées avant 1980.

La chimie de base de l'appauvrissement de l'ozone par des substances telles que le brome et le chlore est présentée à la figure 34. Les atomes libres de chlore, par exemple, réagissent très rapidement avec l'ozone et forment un sous-produit, le monoxyde de chlore. Ce dernier libère à son tour son atome d'oxygène pour former de l'oxygène moléculaire, et l'atome de chlore peut reprendre le processus. Dans ce cycle continu de réactions, chaque atome de chlore joue un rôle de catalyseur et peut entraîner la destruction de quelque 100 000 molécules d'ozone ou plus avant que la réaction en chaîne ne s'arrête.

En raison de leur stabilité, les CFC sont un véhicule particulièrement efficace pour le transport du chlore et du brome dans la haute atmosphère. On estime que les composés de CFC les plus courants (CFC-11, CFC-12 et CFC-113) séjournent de 50 à 100 ans dans l'atmosphère. Ils ne se décomposent qu'après avoir été exposés au fort rayonnement de la haute atmosphère, de sorte que le phénomène ne se produit que là où il fait le plus de tort : dans la couche d'ozone.

La mesure de la quantité d'ozone

La colonne d'ozone total au-dessus d'un point particulier peut varier jusqu'à 15 % durant une année. C'est pourquoi il est difficile de mesurer les tendances à long terme de pourcentages minimes, et encore plus de trouver des preuves concluantes de l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique. Comme il est important de surveiller attentivement la colonne d'ozone, la communauté scientifique internationale a mis sur pied un réseau mondial de stations de mesure. Les observations de ces stations sont traitées au Centre mondial des données sur l'ozone, exploité par Environnement Canada à Toronto.

La mesure de la quantité d'ozone dans la haute atmosphère fait appel à diverses techniques. D'énormes ballons à l'hélium, qui emportent des instruments jusqu'à 40 km d'altitude, et des fusées de haute altitude permettent de mesurer la répartition verticale de ce gaz. Certains instruments sont assez sensibles pour mesurer, à partir du sol, la quantité d'ozone dans la haute atmosphère; d'autres sont embarqués à bord de satellites et donnent un aperçu de la profondeur totale de la couche d'ozone. Même la navette spatiale a été mise à contribution. En 1984, l'astronaute canadien Marc Garneau a mesuré la quantité d'ozone et de brume sèche dans la haute atmosphère, à l'aide d'un héliophotomètre mis au point par des scientifiques canadiens. En 1992, un autre astronaute canadien, Steve McLean, a repris l'expérience avec un spectrophotomètre solaire.

Au Canada, cinq stations (Toronto, Edmonton, Churchill, Goose Bay et Resolute) effectuent des mesures au sol depuis le début des années 1960 et on en a ajouté huit autres dans les décennies suivantes. Un des instruments d'abord mis au point pour une utilisation canadienne, le spectrophotomètre Brewer de mesure de l'ozone, s'est révélé l'outil le plus précis du monde; il est maintenant utilisé dans plus de 100 stations du réseau mondial de mesure.

D'autres importants destructeurs d'ozone sont également très stables et restent donc dans l'air suffisamment longtemps pour que de grandes quantités atteignent la stratosphère. Les hydrochlorofluorocarbures (HCFC), le chlorure de méthyle et le tétrachlorure de carbone transportent aussi le chlore vers la haute atmosphère, tandis que les halons et le bromure de méthyle sont les principales sources de brome. L'hydrogène, l'azote et

La quantité d'ozone dans l'atmosphère est généralement exprimée en unités Dobson (UD). Ainsi, 100 UD représentent une couche de 1 mm d'ozone à la température et à la pression normales de la surface. Les études montrent que la quantité d'ozone peut varier de plus de 400 UD au printemps dans les régions polaires à moins de 250 UD toute l'année à l'équateur. Dans l'Antarctique, la différence entre le printemps et l'automne peut atteindre 50 %. Dans le trou d'ozone de l'Antarctique, qui se forme au printemps austral quand la quantité d'ozone devrait être à son maximum, on a obtenu des relevés de moins de 100 UD.

Les résultats des stations des plus hautes latitudes de l'hémisphère Nord indiquent généralement une tendance à la baisse (voir le tableau). Cette diminution est à peu près du même ordre aux latitudes moyennes et dans l'Arctique et elle est encore plus marquée en hiver qu'en été. Les plus récentes tendances semblent même indiquer que le rythme de diminution s'accélère. Par exemple, la quantité d'ozone au-dessus de Toronto a baissé d'environ 4 % dans les 10 dernières années. Ces tendances pourraient certes être imputables aux variations naturelles causées par des phénomènes comme le cycle de onze ans des taches solaires; néanmoins, leur ampleur suscite des inquiétudes.

Changements de la quantité moyenne d'ozone total, 1970–1991

Station	Latitude	Pourcentage de changement par décennie		
		Été	Hiver	Année
Churchill	58,8°	-3,2	-4,2	-2,5
Edmonton	53,6°	-0,7	-2,6	-1,4
Goose Bay	53,3°	-1,5	-1,4	-1,3
Toronto	43,8°	-1,3	-3,1	-1,5

le fluor peuvent aussi accélérer la décomposition de l'ozone et être emportés vers la haute atmosphère par des molécules stables et relativement insolubles, comme l'oxyde nitreux, le méthane et les gaz fluorés.

Les concentrations atmosphériques observées des trois principaux CFC ont monté rapidement dans les années 1970,

quand l'utilisation de ces substances par l'industrie et les consommateurs s'est généralisée. En 1974, la production annuelle mondiale approchait un million de tonnes. C'est au même moment que les concentrations de chlore dans l'atmosphère ont aussi augmenté significativement. On estime que l'abondance « naturelle » de chlore libre dans l'atmosphère avant 1900 était d'environ 0,6 parties par 10^{-9} en volume (ppbv) et provenait en quasi-totalité du chlorure de méthyle. Elle est de 3,6 ppbv à l'heure actuelle et augmente rapidement. Même si les concentrations de brome dans l'atmosphère sont encore assez basses, celles de certains produits bromés, tels les halons 1301 et 1211, ont augmenté de plus de 10 % par année. Grâce aux mesures prises aux termes du Protocole de Montréal et de ses modifications (voir le chapitre 7) pour limiter et, éventuellement, éliminer les émissions des plus importantes substances destructrices d'ozone, le taux d'augmentation des concentrations de chlore et de brome a ralenti considérablement

et devrait se stabiliser d'ici l'an 2000. Malgré cette amélioration, le long temps de séjour des substances destructrices d'ozone déjà présentes dans l'atmosphère se traduira par une diminution peu rapide, d'ici l'an 2100 au moins, des concentrations de chlore et de brome par rapport aux maximums observés.

Il y a plus de 10 ans que l'on étudie l'appauvrissement de la couche d'ozone par les CFC et d'autres composés, et les évaluations actuelles de l'étendue de cette destruction ne sont guère plus basses que les premières faites dans les années 1970. Le trou d'ozone au-dessus de l'Antarctique continue de se former chaque année, sa profondeur et son étendue augmentant graduellement depuis sa première observation en 1985. Il était particulièrement important en 1992 et 1993 lorsque, en octobre, presque tout l'ozone entre 14 et 19 km a disparu. On s'est aperçu que le problème était beaucoup plus complexe qu'on ne le croyait au départ et que plusieurs autres sources de pollution, tels les aérosols produits par l'éruption du mont Pinatubo, ont une incidence sur la quantité totale d'ozone présente dans l'atmosphère. Dans la basse atmosphère, la production accrue de smog chimique imputable au transport routier dans les régions industrialisées a conduit à une augmentation de la quantité d'ozone près de la surface terrestre. En outre, les changements de température occasionnés en haute altitude par l'amplification de l'effet de serre auront pour résultat une production accrue d'ozone dans la basse stratosphère et un ralentissement des processus de destruction. Ces processus, et d'autres, peuvent soit empirer, soit compenser partiellement l'appauvrissement de la couche d'ozone par des substances destructrices tels les CFC.

Figure 34
Destruction de l'ozone par des catalyseurs

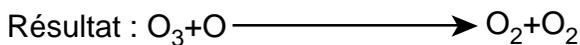
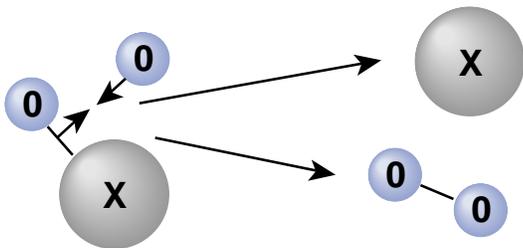
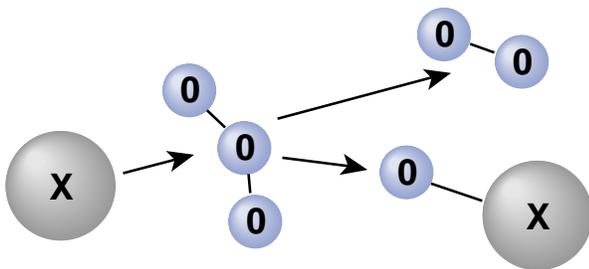


Illustration du processus de destruction de l'ozone atmosphérique par des catalyseurs (X) comme le chlore, le brome, l'azote et l'hydrogène.

Les effets de l'appauvrissement de la couche d'ozone

L'épaisseur de la couche d'ozone varie naturellement avec la latitude. Généralement, elle est plus grande aux pôles, où le rayonnement solaire est le plus faible, et moindre à l'équateur, où il est le plus fort. Les régions tropicales reçoivent donc nettement plus de rayonnement UV-B que les latitudes plus élevées. De fait, à l'équateur, près de 30 % des UV-B qui pénètrent dans l'atmosphère atteignent la surface de la Terre, tandis qu'aux latitudes plus élevées, cette proportion peut varier de près de 30 % par une claire journée d'été à seulement 10 % par un jour d'hiver nuageux. Les scientifiques estiment que, dans le cas de l'Amérique du Nord continentale, l'exposition moyenne de la surface aux UV-B augmente de 1 % pour un déplacement de 2 ou 3° de latitude vers le sud.

Depuis quelques années, durant les épisodes du trou d'ozone, on observe une forte augmentation du rayonnement UV-B dans l'Antarctique et dans les régions des hautes latitudes de l'Amérique du Sud. On a aussi relevé le même phénomène

au-dessus de Toronto, dans l'hémisphère Nord, durant les périodes où la quantité d'ozone était peu élevée en 1993. Même si ces changements concordent bien avec ceux prévus par les modèles de rayonnement, la courte période d'enregistrements de bonne qualité des mesures du rayonnement UV en surface ne permet pas encore d'avoir des preuves irréfutables d'une augmentation à long terme de l'intensité des UV-B en surface depuis la fin des années 1970, lorsque la quantité d'ozone a commencé à diminuer.

Les variations naturelles de l'intensité des UV-B avec la latitude peuvent donner des indices sur les conséquences possibles de l'appauvrissement de la couche d'ozone. Parmi les plus inquiétantes figure l'augmentation des cas de cancer de la peau, surtout chez les populations à peau blanche. Les études montrent que l'incidence du cancer est en étroite corrélation avec la latitude, donc avec l'intensité de l'exposition aux UV-B. Dans une région du Texas, par exemple, le taux d'incidence de tous les types de cancer de la peau (379 cas pour 100 000 personnes par année) est trois fois supérieur à ce qu'il est plus au nord, en Iowa. Si l'on considère l'ensemble des États-Unis, le taux de mortalité par cancer de la peau de type mélanome est deux fois plus élevé dans les États du Sud que dans ceux du Nord (figure 35). Dans l'ancienne URSS, les cancers de la peau représentaient 15 à 26 % de tous les cas de

cancer dans les régions du Sud et 9 à 14 % dans celles du Nord. Chez les populations à peau blanche, les taux de cancer les plus élevés sont observés dans le nord de l'Australie, où l'exposition aux UV-B est très forte.

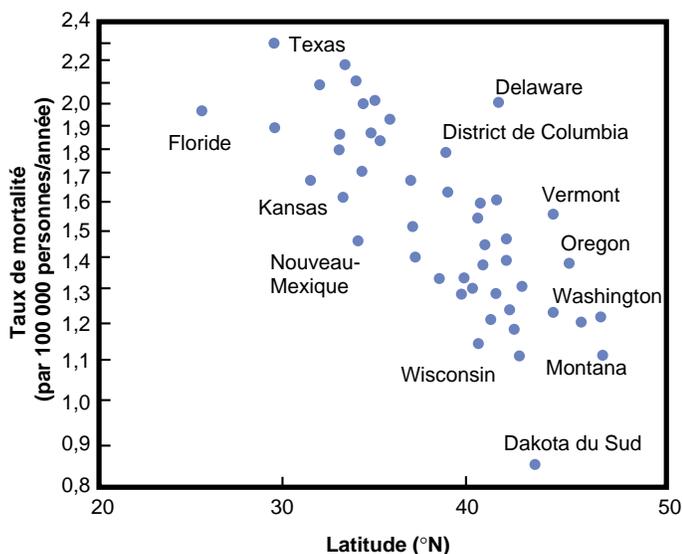
L'augmentation de l'exposition aux UV-B peut avoir d'autres répercussions sur la santé humaine. Les recherches ont montré que le système immunitaire devient moins efficace à mesure qu'augmente cette exposition et que des maladies des yeux, comme les cataractes, risquent davantage de se produire.

D'autres animaux et organismes vivants font face également à des risques accrus. Comme les UV-B peuvent pénétrer dans l'eau claire, même certaines formes de vie marine (comme les algues, le plancton et les larves de poissons) sont vulnérables. Les études de laboratoire sur les effets des UV-B sur les plantes montrent que, généralement, la photosynthèse décroît en raison des dommages subis par la chlorophylle et les hormones des plantes. Les expériences portant sur des plantes comme les cotonniers, les pois, les haricots, les melons et les choux montrent une nette baisse de rendement quand l'exposition aux UV-B est plus élevée, tandis que certaines autres plantes semblent plus résistantes aux dommages, car leurs cellules contiennent des substances protectrices naturelles. Les résultats d'études récentes indiquent aussi que le déclin des populations de certaines espèces d'amphibiens pourrait être associé à une plus grande exposition aux UV-B. Tout ceci porte à croire que l'appauvrissement de la couche d'ozone pourrait avoir de graves répercussions tant sur la production mondiale de nourriture que sur les écosystèmes naturels.

Cet accroissement de l'intensité du rayonnement UV à la surface de la Terre se traduira aussi par une accélération des processus causant le smog photochimique, mettant la santé humaine encore plus en péril et infligeant d'autres dommages aux plantes. Même les matériaux subiront les effets d'une exposition plus élevée aux UV-B. Les peintures deviendront fades plus vite et les plastiques se dégraderont plus rapidement, ce qui réduira la durée de vie de bien des produits d'usage courant.

Enfin, les changements de la colonne d'ozone (la répartition verticale de l'ozone dans l'atmosphère) auront une incidence sur le climat de la planète. À mesure qu'il passera plus de rayonnement UV à travers une couche d'ozone appauvrie, la quantité d'ozone produite dans la basse atmosphère augmentera. Comme l'ozone absorbe tant la lumière solaire que l'énergie thermique infrarouge, tout changement de sa répartition modifiera les températures de l'atmosphère, lesquelles régissent les configurations de la circulation mondiale et les précipitations.

Figure 35
Taux de mortalité par cancer de type mélanome en fonction de la latitude, aux États-Unis



SOURCE : Programme des Nations Unies pour l'environnement, 1987.

Chapitre 7

Comment réagissons-nous?

L'appauvrissement de la couche d'ozone et le changement climatique ne sont pas des préoccupations environnementales distinctes, mais bien deux aspects intimement liés de la même grande question fondamentale : l'effet des activités humaines sur la composition chimique de l'atmosphère elle-même. Non seulement l'appauvrissement de la couche d'ozone et le changement climatique ont-ils certaines causes en commun, mais leur interaction est aussi complexe. Par exemple, les CFC menacent la couche d'ozone et amplifient également l'effet de serre. De même, la combustion d'essence dans les moteurs des véhicules automobiles produit à la fois du dioxyde de carbone et de l'oxyde nitreux (deux gaz à effet de serre, dont le dernier détruit aussi la couche d'ozone).

En outre, le changement climatique peut avoir une incidence directe sur la répartition de l'ozone. Par exemple, un effet de serre amplifié augmenterait la température dans la basse atmosphère mais l'abaisserait dans la haute atmosphère. Comme le taux net de production d'ozone augmente avec un abaissement de la température de l'air, un tel phénomène compenserait en partie l'appauvrissement chimique de la couche d'ozone.

Mais l'inverse est aussi vrai : des changements de la répartition de l'ozone peuvent aussi influencer le climat. Étant donné que l'ozone absorbe le rayonnement solaire incident et réchauffe l'air environnant, une modification de sa quantité dans une couche particulière de l'atmosphère influera sur la température du milieu. Ces changements de température, à leur tour, pourraient entraîner un déplacement de la circulation atmosphérique et, de là, un changement dans les configurations climatiques à l'échelle du globe.

Les activités humaines à l'origine des changements atmosphériques se divisent en trois grandes catégories connexes : les changements dans l'utilisation des terres, les activités industrielles et la combustion de combustibles fossiles. Ces mêmes activités causent aussi d'autres grands problèmes de contamination de l'atmosphère, comme la pollution de l'air à l'échelle locale, les dépôts acides et la brume arctique, qui ont aussi des liens complexes avec le réchauffement de la planète et l'appauvrissement de l'ozone. Par exemple, l'ozone de la basse troposphère, un des principaux composants du smog, contribue à l'effet de serre directement et en détruisant les

molécules d'hydroxyle qui débarrassent l'atmosphère du méthane. De même, la brume arctique est un problème préoccupant, non seulement à cause de ses effets sur l'écologie de l'Arctique, mais aussi parce qu'elle intensifie le réchauffement hivernal dans le Grand Nord, ce qui influe sur le système climatique mondial.

Les dégâts infligés à l'environnement sont parfois la résultante de plusieurs de ces stress. Les forêts agressées par l'acidité accrue des sols, par exemple, peuvent être beaucoup plus vulnérables aux variations ou aux extrêmes climatiques. Les données scientifiques recueillies laissent penser que le dépérissement à grande échelle des forêts européennes n'est pas dû à une cause unique mais à un ensemble de facteurs : dommages imputables à l'ozone de la basse troposphère, dépôts acides et sécheresse.

Il est donc indispensable de comprendre ces interrelations pour formuler une politique efficace en réaction à ces questions. En s'attaquant à l'un de ces problèmes, on touche à plusieurs autres, voire à tous; les stratégies ne doivent donc pas être élaborées au coup par coup. Seule une approche holistique pourra donner des résultats probants.

Comment faire face aux incertitudes scientifiques?

En juin 1988, la Conférence mondiale sur l'Atmosphère en évolution réunissait à Toronto des décideurs, des scientifiques, des économistes et d'autres experts venus du monde entier. Tous s'inquiétaient beaucoup de ce que l'incidence des activités humaines sur l'atmosphère était devenue telle qu'elle constituait une expérience inconsciente qui touche l'ensemble du globe et dont les conséquences définitives ne le céderaient, en gravité, qu'à une guerre nucléaire mondiale. Sept mois plus tard, l'Assemblée générale des Nations Unies faisait écho à ces préoccupations et incitait le gouvernement du monde entier à considérer le changement climatique comme une question prioritaire. Par la suite, des conférences ministérielles tenues aux Pays-Bas (novembre 1989), en Norvège (mai 1990) et en Suisse (novembre 1990) soulignaient la nécessité d'entreprendre la négociation d'ententes internationales visant à stabiliser les émissions de gaz à effet de serre le plus tôt possible.



Des scientifiques et des décideurs discutent du réchauffement climatique pendant la Conférence de Toronto de 1988.

Il n'est pas surprenant que, dans le monde entier, d'éminents politiciens et scientifiques continuent d'exprimer les mêmes grandes préoccupations. Comme il s'écoulera probablement des décennies avant que l'atmosphère ne réagisse aux mesures qui seront mises en œuvre, la plupart des experts s'entendent pour que des décisions soient prises immédiatement. Cette conclusion s'impose d'autant plus qu'un grand nombre des conséquences du changement atmosphérique risquent d'être irréversibles et que la société est souvent lente à changer. Les décisions que nous prenons — ou ne prenons pas — aujourd'hui façonneront l'évolution de la société et de l'environnement pour les décennies, voire les siècles à venir.

On observe aussi, particulièrement à l'égard du réchauffement climatique, une vive opposition de la part de gens qui affirment qu'il ne faut pas prendre de mesures précipitées maintenant. D'après les arguments avancés, non seulement les connaissances sont-elles encore insuffisantes quant aux phénomènes se déroulant dans l'atmosphère et à la façon dont cette dernière réagira, mais une grande partie des informations scientifiques sont de nature spéculative et certaines conclusions pourraient être totalement fausses. Des scientifiques et des décideurs avancent même l'idée que, étant donné le coût des mesures de réduction des émissions polluantes, il serait préférable d'attendre, avant d'agir, d'être certains que les mesures sont nécessaires et que les choix qui s'offrent sont mieux compris.

Il faut donc faire un choix entre, d'une part, les coûts économiques et sociaux des mesures pouvant être prises maintenant et, d'autre part, le risque de changements écologiques susceptibles d'être catastrophiques ou de ne jamais

se manifester. Que faire devant un tel dilemme? Comment mesurer le poids de l'incertitude scientifique par rapport à des coûts pouvant entraîner des bouleversements et aux risques peut-être énormes de prendre des mesures erronées? L'élaboration d'une stratégie appropriée passe peut-être par l'évaluation et l'analyse des risques, une technique couramment utilisée dans des domaines où règne l'incertitude, comme l'économie et l'actuariat, et qui est souvent employée inconsciemment pour prendre des décisions personnelles.

Quand on prend ce genre de décisions, il y a deux types d'erreur que l'on risque de commettre. La première erreur, celle de type I, est de prendre des mesures en prévision de quelque chose qui ne se matérialise pas. La seconde, celle de type II, est de ne pas prendre de mesures anticipatoires en regard de quelque chose qui finit par se produire. La prise de décision repose habituellement sur la probabilité que l'événement se produise, le coût des mesures anticipatoires et les conséquences possibles qu'aurait l'événement le cas échéant. Si le coût des mesures est trop élevé, étant donné le degré d'incertitude, et que celui de l'inaction reste acceptable, alors on peut prendre le risque d'une erreur de type II et ne rien faire. Dans d'autres cas, si les mesures sont relativement peu coûteuses ou que les conséquences de l'inaction risquent d'être graves, il est préférable de réagir. C'est ainsi que nous assurons nos maisons contre l'incendie, même si le risque en est relativement bas, parce que les primes d'assurance sont minimes en comparaison des coûts du sinistre. En appliquant ces stratégies de réflexion, il est possible de déterminer les domaines où il convient de prendre des mesures immédiates et ceux qui exigent une meilleure compréhension et une évaluation plus précise.

Vers un accord international

En intégrant l'évaluation des risques à ses méthodes de planification, chaque pays peut prendre de nombreuses mesures utiles. Toutefois, malgré la valeur de mesures prises unilatéralement, il est essentiel que tous les pays du monde collaborent pour que leur réaction au changement climatique soit efficace à l'échelle de la planète. Une étape critique de cette réaction est donc l'établissement d'un consensus.

Ces dernières années, la communauté internationale des décideurs a tenté, avec ses conseillers, d'en arriver à une compréhension commune des questions et d'explorer la faisabilité d'une action collective à l'échelle du globe. Il en est résulté un début de consensus international basé sur les mesures à prendre et dont les principes d'action sont les suivants :

1. *Le principe fondamental du développement durable doit être sous-jacent à toute stratégie d'action. L'essor*

économique des pays tant industrialisés qu'en développement passe nécessairement par la gestion et la protection des ressources de l'environnement. Loin d'être contradictoires, les intérêts de l'économie et ceux de l'environnement dépendent l'un de l'autre de bien des façons. On doit envisager de nouvelles approches pour intégrer les préoccupations environnementales et sociales à la prise de décisions économiques d'une manière plus systématique, plus ciblée et mieux coordonnée.

2. *Les mesures doivent être basées sur les meilleures connaissances scientifiques disponibles.* L'Organisation météorologique mondiale, en collaboration avec le Programme des Nations Unies pour l'environnement et le Conseil international des unions scientifiques, a activement contribué à évaluer les enjeux que constituent le changement climatique et l'appauvrissement de la couche d'ozone et à organiser des recherches supplémentaires dans le monde entier. Par contre, le succès des programmes internationaux repose sur le dynamisme des programmes nationaux. Même si bien des pays ont créé de tels programmes, ils ont besoin de ressources accrues et d'une plus grande coordination. Il faudra aussi consacrer davantage d'efforts à la mise au point des stratégies et des techniques nécessaires pour faire face à ces enjeux.
3. *Des mesures doivent être prises maintenant pour limiter le changement atmosphérique.* La simple précaution veut que, s'il existe un risque de dommages graves ou irréversibles, l'absence de certitude scientifique totale ne doit pas justifier que l'on tarde à prendre des mesures visant à prévenir la dégradation de l'environnement. Toute action visant à limiter le changement atmosphérique est donc essentielle et nullement prématurée. De fait, ce genre d'action accuse peut-être déjà un retard. Le Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone est un bon exemple de ce qui peut être fait. C'est grâce à cette entente que l'utilisation des CFC sera pour ainsi dire éliminée d'ici la fin du siècle. On pourrait aussi parvenir à réduire considérablement les émissions de dioxyde de carbone grâce à deux mesures simultanées : l'amélioration de l'efficacité énergétique et la mise au point de produits de remplacement des combustibles fossiles.
4. *Les mesures doivent être équitables.* Les pays industrialisés ont été et sont encore la principale source des polluants à l'origine du changement atmosphérique, mais ce sont peut-être les pays en développement qui sont le plus vulnérables aux conséquences de ce changement et le moins en mesure d'y faire face. Les pays industrialisés

doivent donc assumer la responsabilité première de la réduction des émissions de polluants atmosphériques. Par contre, à l'heure actuelle, les pays en développement sont à l'origine de la quasi-totalité des émissions de carbone attribuables au déboisement des forêts tropicales, et leur présent apport de 30 % aux émissions mondiales de carbone provenant de l'utilisation des combustibles fossiles passera probablement à plus de 50 % d'ici 2050. Il est donc essentiel que ces pays prennent aussi des mesures actives visant à limiter les émissions polluantes futures. Toutefois, pour qu'ils puissent y parvenir tout en étendant leurs perspectives de développement et en se préparant aux incidences du changement climatique, il faudra innover dans le domaine des partenariats et des mécanismes de financement.

5. *Les mesures doivent être coordonnées et coopératives.* L'atmosphère, élément essentiel de l'environnement, est accessible à tous mais n'appartient à personne. Par conséquent, non seulement est-il crucial d'assurer sa protection pour le bien-être commun, mais encore est-ce la responsabilité de tous.
6. *Les mesures exigent une plus grande sensibilisation du public.* À bien des points de vue, c'est là le principe le plus important puisque l'efficacité des mesures dépend de l'état de l'opinion, où ni l'apathie ni l'hystérie n'ont leur place face aux enjeux en question.

La réaction à l'échelle planétaire

Le changement atmosphérique n'est devenu une grande question d'actualité qu'au début des années 1970, et c'est seulement vers la fin de cette même décennie que d'importants programmes internationaux de recherche sur le sujet ont été entrepris.

En 1979, un grand élan a été donné à la collaboration internationale dans l'étude du réchauffement planétaire et du changement climatique, quand l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et deux autres organismes scientifiques internationaux ont lancé le Programme climatologique mondial. Ce dernier avait pour but de promouvoir et de coordonner la recherche internationale sur les processus climatiques planétaires et sur les incidences de la variabilité et du changement du climat. En 1986, le Conseil international des unions scientifiques a mis sur pied son ambitieux Programme international géosphère-biosphère destiné à améliorer notre compréhension de la manière dont la Terre entretient un écosystème vivant et à examiner l'évolution passée et présente de cet écosystème. Un programme complémentaire sur la Réaction de l'homme aux changements dans le monde a aussi

été créé conjointement par un autre groupe d'organismes scientifiques internationaux.

Ces programmes ont déjà substantiellement accru notre compréhension du système climatique mondial et la sensibilisation de la société aux changements qui s'y produisent. Les recherches qui se poursuivent étoffent notre connaissance de la façon dont certains éléments, comme les nuages, la glace de mer et le cycle de l'eau, influent sur les processus climatiques. Elles contribuent aussi à éclaircir certaines grandes incertitudes telles que le rôle complexe des océans en tant que réservoir de gaz à effet de serre et en tant que puits, source et véhicule de chaleur. Comme l'incidence des variations climatiques sur les écosystèmes variera d'une région à l'autre, on consacre de grands efforts à élaborer des modèles plausibles des changements climatiques régionaux. À mesure que la recherche avancera, les études d'incidence devront déterminer quels systèmes naturels et humains sont les plus vulnérables au changement climatique et examiner ces systèmes plus en profondeur que les études actuelles ne peuvent le faire. Elles devront porter une attention particulière à l'incidence totale de toutes les agressions subies par les écosystèmes naturels, dont les dépôts acides, l'augmentation du rayonnement ultraviolet, la pollution atmosphérique locale et le changement climatique lui-même.

La mise en œuvre de tels programmes internationaux de recherche repose sur des programmes nationaux étoffés et dotés d'un financement suffisant. Comme plusieurs autres pays, le Canada a instauré des programmes nationaux de recherche climatique dans le cadre de ces activités multinationales. Il n'y a cependant pas assez de programmes nationaux, surtout dans les pays en développement, et les ressources attribuées à la plupart de ceux qui existent ne sont pas suffisantes pour que toute la recherche nécessaire puisse être entreprise. Il est donc crucial de renforcer ces programmes et d'en élargir la portée.

Cependant, pour que les nouvelles connaissances scientifiques soient mises à la disposition de la communauté des décideurs sans délai et efficacement, il faut procéder à des évaluations internationales régulières et complètes de l'état actuel des sciences. Des évaluations internationales officielles des questions touchant à l'ozone, entreprises en 1977 sous l'égide du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) et de l'OMM, se poursuivent à des intervalles réguliers, la dernière ayant été préparée en 1994. En 1988, les responsables du PNUE et l'OMM ont collaboré à la mise sur pied du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), qui procédera à des évaluations similaires de la science du changement climatique. Le GIEC a produit son premier rapport complet en 1990, avec des mises à jour en 1992 et 1994. Une deuxième évaluation complète sera produite en 1995.

Les gouvernements du monde ont aussi franchi de grands pas dans l'instauration de mesures visant à réduire les risques d'un changement atmosphérique. La Conférence mondiale sur l'Atmosphère en évolution, tenue à Toronto en 1988 sous les auspices du gouvernement canadien, a été l'un des points tournants de ce processus. La conférence, qui réunissait près de 300 politiciens et conseillers politiques, experts juridiques, défenseurs de l'environnement et chercheurs a permis d'échanger des idées sur le fondement scientifique des préoccupations entourant le changement atmosphérique et de recommander un plan d'action à la communauté mondiale. La prise de conscience des décideurs quant à ces préoccupations, de même que la recommandation de réduire de 20 %, d'ici 2005, les émissions mondiales de dioxyde de carbone par rapport aux niveaux de 1988, ont constitué les deux plus importants résultats de la conférence.

Par suite de la conférence de Toronto, les Nations Unies ont mis sur pied un Comité intergouvernemental de négociation d'une Convention-cadre sur le changement climatique. Après moins de deux ans de négociations intensives, la Convention-cadre a été approuvée à la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement tenue à Rio de Janeiro en 1992. Depuis, elle a été ratifiée par 90 pays. La première réunion des signataires a eu lieu à Berlin au début de 1995. La finalité de la Convention-cadre est de stabiliser les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre à un niveau où les activités humaines ne seraient pas dangereuses pour le système climatique. Un premier pas a été franchi en ce sens lorsque tous les pays industrialisés signataires de la Convention-cadre se sont engagés à élaborer des programmes nationaux dans le but de limiter, avant l'an 2000, leurs émissions de tous les gaz à effet de serre aux niveaux de 1990.

La réaction politique internationale au changement climatique est un phénomène encore récent, mais les mesures visant à limiter l'appauvrissement de la couche d'ozone ont commencé au début des années 1980 et sont déjà fort avancées. Dès 1982, les responsables du PNUE ont envisagé la possibilité d'élaborer une convention mondiale sur la protection de la couche d'ozone; en 1985, la Convention de Vienne sur la protection de la couche d'ozone a été le fruit des négociations entreprises. Toutefois, ce n'est qu'en 1987, avec la signature du Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone, que des engagements en vue d'atténuer les menaces à la couche d'ozone ont été pris. Aux termes du Protocole, tous les pays industrialisés ont convenu de réduire, d'ici 1999, leur consommation de substances destructrices d'ozone (surtout les CFC) à 50 % des niveaux de 1986. Pour les pays en développement, cet objectif devra être atteint d'ici 2009. Plus de 130 pays ont maintenant signé et ratifié la Convention de Vienne et le Protocole de Montréal.

Bien que l'objectif initial du Protocole de Montréal ait contribué à atténuer grandement la menace d'un appauvrissement de la couche d'ozone, beaucoup de scientifiques étaient d'avis que l'objectif de 50 % était insuffisant et que le Protocole devait être renforcé en vue d'éliminer les émissions des CFC les plus nocifs et de réduire davantage les émissions d'autres gaz destructeurs. Cette opinion a reçu l'appui de plusieurs pays, dont le Canada, au cours de discussions internationales ultérieures et a conduit à deux modifications du Protocole. La première, signée à Londres en juin 1990, engageait les parties au protocole à éliminer complètement l'utilisation des CFC et des halons les plus destructeurs avant l'an 2000. La deuxième, signée à Copenhague en novembre 1992, ramène la date à 1996 pour tous les CFC et à 1994 pour les halons les plus destructeurs. En septembre 1994, la modification de Londres avait été ratifiée par plus de 90 pays. Trente de ces pays, dont le Canada, se sont engagés à respecter la modification de Copenhague.

La réaction du Canada

Au Canada, nombre d'universités et d'instituts de recherche participent directement ou indirectement aux études sur le changement climatique. Toutefois, les efforts formels de recherche dans ce domaine sont coordonnés par le biais du Programme climatologique canadien (PCC), administré par Environnement Canada. Dans la dernière décennie, les responsables du PCC, en étroite collaboration avec ceux du Programme climatologique mondial, ont parrainé des recherches poussées sur les processus climatiques et sur les répercussions du changement climatique pour la population



Station canadienne de surveillance des gaz à effet de serre à Alert (Territoires du Nord-Ouest). On trouve d'autres stations sur l'île de Sable (Nouvelle-Écosse), à Fraserdale (Ontario) et à Estevan Point (Colombie-Britannique).

canadienne. En tant que membre du réseau de stations de surveillance de la pollution atmosphérique de fond de l'OMM, le Canada mesure les concentrations de dioxyde de carbone et de plusieurs autres gaz atmosphériques à quatre stations [île de Sable (Nouvelle-Écosse), Alert (Territoires du Nord-Ouest), Fraserdale (Ontario) et Estevan Point (Colombie-Britannique)]. On procède également à des études sur les incidences climatiques de l'amplification de l'effet de serre à l'aide du modèle évolué de circulation générale d'Environnement Canada.

Simultanément, un grand nombre d'études parrainées par le PCC ont été menées sur les effets d'un climat à double teneur en dioxyde de carbone sur les écosystèmes et les activités économiques et sociales du Canada. D'autres études ont porté sur les climats préhistoriques, les tendances actuelles du climat et le cyclage du carbone dans la biosphère, les océans et l'atmosphère. Des ententes bilatérales d'échange et de coopération scientifiques sur les enjeux du changement climatique ont été conclues avec plusieurs pays, dont la Chine, l'Allemagne, les Pays-Bas et la Russie.

Sur le plan international, le Canada donne le ton en ce qui concerne les réactions politiques au changement climatique. Il a été l'hôte de la Conférence mondiale de 1988 sur l'Atmosphère en évolution, de même que des discussions de suivi tenues par des juristes internationaux sur l'élaboration d'une convention-cadre internationale visant à protéger l'atmosphère. Il participe toujours activement aux travaux du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat et à l'amélioration de la Convention-cadre sur le changement climatique.

L'apport du Canada aux émissions mondiales de substances chimiques qui modifient l'atmosphère n'est pas très élevé, mais celui de ses habitants l'est. Ainsi, les émissions de l'ensemble du pays ne comptent que pour 2 %, environ, des émissions mondiales de dioxyde de carbone attribuables à la combustion de combustibles fossiles, ce qui représente toutefois quelque 17 t par habitant et par année. C'est là deux fois plus que les émissions moyennes par habitant des pays développés de l'Europe de l'Ouest et environ quatre fois plus que la moyenne mondiale.

Le climat nordique du Canada, l'étendue du territoire et une économie basée sur l'usage intensif des ressources naturelles contribuent tous à une consommation relativement élevée d'énergie par personne. Malgré cela, de nombreuses possibilités s'offrent aux Canadiens et aux Canadiennes de réduire leur consommation d'énergie et, du même coup, leurs émissions de dioxyde de carbone. Une telle réduction est

Le Programme d'action nationale sur le changement climatique

Le Programme d'action nationale sur le changement climatique fournit les orientations stratégiques qui aideront à stabiliser les émissions de gaz à effet de serre au Canada d'ici l'an 2000 et décrit une gamme de mesures nécessaires pour respecter cet engagement. Il reconnaît aussi, dans son volet associé à la réaction au réchauffement climatique, l'importance que présentent à long terme l'inclusion de mesures visant à réduire les incertitudes scientifiques connexes et l'amélioration des aptitudes de la population canadienne à s'adapter aux effets du changement climatique.

Le Programme a été élaboré par le biais de consultations auprès des gouvernements fédéral et provinciaux, du secteur privé et des groupes d'intérêt voués à l'environnement et à d'autres causes. Les options ont été évaluées en fonction d'un certain nombre de principes et critères communs tels que l'efficacité, l'adaptabilité et la souplesse maximales, la minimisation des coûts et le partage des responsabilités entre les intervenants.

Certaines des mesures retenues recourent plusieurs secteurs de la société canadienne, notamment le défi lancé aux industries pour qu'elles élaborent des mesures volontaires de réduction de leurs émissions, de même que la modification du comportement des consommateurs par le biais de la modification des prix des produits ou la

sensibilisation du public. Toutefois, la plupart des mesures sont détaillées et visent des secteurs particuliers, de sorte qu'il est possible de les associer directement à des sources précises d'émissions.

Les principales options du Programme sont les suivantes :

- établissement de stimulants, de règlements et de programmes de formation technique pour améliorer le rendement thermique des immeubles tant anciens que nouveaux, et amélioration de l'efficacité énergétique de l'éclairage, des appareils ménagers et d'autres équipements des secteurs résidentiel et commercial;
- analyse des subventions versées aux secteurs de l'énergie, du transport, de l'agriculture et des forêts;
- mesures incitant les automobilistes à acheter des véhicules à faible consommation de carburant, à diminuer leurs déplacements en voiture et à conduire de façon plus efficace;
- aménagement de nouvelles forêts afin de créer des puits naturels pour le dioxyde de carbone.

nécessaire pour que le Canada puisse maintenir la crédibilité acquise à l'échelle mondiale en matière d'environnement. En outre, bon nombre des mesures nécessaires pour réduire ces émissions atténueront les dangers d'autres problèmes environnementaux, sans compter qu'elles pourraient être avantageuses sur le plan économique et permettre à notre économie de demeurer concurrentielle face aux autres pays.

Puisque nous devons réduire nos émissions de dioxyde de carbone, comment y parvenir le plus efficacement possible? Les prévisions des experts en énergie indiquent que, sans des mesures précises de réduction des émissions, ces dernières seront peut-être 13 % plus élevées en l'an 2000 qu'elles ne l'étaient en 1990. Selon diverses études sur le potentiel de réduction de ces émissions, il est possible de stabiliser les émissions aux niveaux de 1990 d'ici l'an 2000 et de procéder à

d'autres réductions dans les années suivantes. Toutefois, bien que plusieurs des mesures nécessaires entraîneraient de grands avantages sociaux et économiques, certaines pourraient occasionner d'importants problèmes pour des régions et des secteurs économiques donnés. Il va de soi que la stabilisation ne sera pas facile à réaliser.

Le fait que toutes ces études reconnaissent que les mesures d'amélioration de l'efficacité énergétique doivent se retrouver au premier rang n'a rien d'étonnant. Les émissions de dioxyde de carbone peuvent aussi être réduites grâce à l'utilisation accrue de l'énergie renouvelable de la biomasse et au perfectionnement des techniques et des installations faisant appel à des sources d'énergie sans carbone, comme les énergies solaire, éolienne et hydroélectrique. Certains experts avancent aussi qu'il est moins dangereux et plus acceptable d'avoir davantage recours

à l'énergie nucléaire, bien qu'elle soit en elle-même une cause de préoccupation environnementale, que de continuer d'utiliser des combustibles fossiles.

En mars 1990, les ministres de l'Environnement se sont entendus pour établir une stratégie nationale sur le réchauffement du globe. Cette stratégie, rendue publique en novembre 1990, vise trois principaux objectifs :

1. limiter les émissions de gaz à effet de serre provenant de toutes les sources;
2. aider la population canadienne à prévoir les effets possibles de tout réchauffement futur et à s'y préparer;
3. améliorer les capacités scientifiques afin de comprendre et de prévoir le changement climatique.

Vers la fin de 1993, les ministres fédéral et provinciaux de l'Environnement ont tenu une réunion sans précédent avec ceux de l'Énergie pour discuter des engagements du Canada en matière de limitation des émissions de gaz à effet de serre. Ils ont convenu de demander à leurs représentants non seulement de concevoir des options permettant au Canada de respecter son engagement face à la stabilisation des émissions de gaz à effet de serre d'ici l'an 2000, mais aussi de trouver d'autres moyens de réduire encore davantage les émissions avant 2005. Les ministres se sont réunis de nouveau en novembre 1994 pour examiner le rapport du groupe de travail multipartite chargé d'élaborer ces options et se sont entendus pour que les mesures volontaires et l'efficacité énergétique soient les éléments clés du programme d'action. La version préliminaire de ce dernier a été approuvée en février 1995 et déposée à la première réunion de la conférence des parties à la Convention-cadre sur le changement climatique tenue à Berlin en avril. Le programme devrait être révisé en décembre 1996.

En ce qui a trait aux efforts destinés à freiner l'appauvrissement de la couche d'ozone, le Canada joue un rôle de premier plan dans les domaines de la coopération scientifique et de l'élaboration de politiques. Dans le cadre de la contribution canadienne à la surveillance mondiale de la couche d'ozone, les scientifiques d'Environnement Canada mesurent régulièrement la colonne d'ozone atmosphérique et collaborent avec d'autres pays à l'étude du tourbillon atmosphérique polaire qui entraîne périodiquement de fortes diminutions saisonnières de l'ozone au-dessus du pôle Nord. Ils exploitent aussi le Centre mondial des données sur l'ozone, qui collige les données recueillies par un réseau mondial de stations coordonnées par l'OMM et qui distribue l'information aux scientifiques du monde entier. Les chercheurs canadiens ont en outre mis au point des instruments très évolués de mesure de l'ozone, comme le spectrophotomètre solaire utilisé à bord de la navette spatiale américaine au cours d'expériences internationales sur la

stratosphère. Cet instrument est en train de devenir la norme pour le réseau mondial de surveillance de l'ozone.

Sur le plan des politiques, le Canada a interdit en 1980 l'utilisation des CFC dans la plupart des aérosols, ce qui a fait baisser de 45 % la consommation de ces substances à l'échelle nationale. De plus, il a toujours préconisé la mise en place de contrôles internationaux plus vastes et, en 1987, a été l'hôte de la rencontre historique dont est issu le Protocole de Montréal. Depuis, le Canada a contribué à convaincre la communauté internationale de viser plus loin que les réductions de 50 % prévues au Protocole et d'éliminer complètement d'ici l'an 2000 l'utilisation des CFC les plus nocifs. Le Canada a annoncé qu'il tentera d'éliminer totalement d'ici 1997 la production des CFC destructeurs d'ozone. Comme les CFC sont aussi des gaz à effet de serre très puissants, cette mesure contribuera à ralentir l'amplification de l'effet de serre, de même qu'à freiner la destruction future de l'ozone.

Le Canada a aussi instauré certains programmes pour aider la population à reconnaître les effets possibles de l'appauvrissement de la couche d'ozone et à s'y adapter. Depuis 1992, Environnement Canada émet quotidiennement un bulletin sur l'indice UV avertissant le public des dangers pour la santé associés à l'exposition au soleil durant les activités à l'extérieur. L'indice UV canadien est basé sur des prévisions quotidiennes des variations de l'épaisseur locale de la couche d'ozone et il couvre des endroits au Canada ainsi que certains lieux populaires de vacances. On mesure l'indice sur une échelle de 1 à 10, les valeurs élevées représentant de plus grands dangers de coups de soleil et de dommages à la peau pendant les périodes d'exposition. Même si l'indice peut fluctuer grandement d'un jour à l'autre, les plus grandes variations sont associées aux changements saisonniers tant de l'intensité du rayonnement solaire que de l'épaisseur de la couche d'ozone; l'heure du jour et la nébulosité entrent également en jeu. L'indice est émis en même temps que les prévisions météorologiques à la radio et à la télévision et il est publié dans les quotidiens.

Le rôle des citoyens

Comment chacun d'entre nous peut-il, comme citoyen, infléchir le résultat d'un problème environnemental mondial qui pose déjà un défi au jugement et aux ressources des organismes internationaux et des gouvernements du globe? La réponse est toute simple : ce sont les citoyens qui, en exprimant leur opinion, créent le climat voulu pour inciter les gouvernements à agir. Ce sont eux qui doivent appuyer les politiques et procéder aux changements qu'exige toute réaction efficace à la crise actuelle.

Par le biais de leur pouvoir d'électeurs, de leurs habitudes de consommation et de leurs gestes quotidiens, les citoyens peuvent influencer les politiciens et les fabricants et s'influencer les uns les autres. Les 23 milliards de tonnes de dioxyde de carbone qui sont rejetés chaque année dans l'atmosphère ne sont pas le fait des gouvernements, mais bien de plus de 5 milliards de personnes qui vivent sur la planète. La contribution de la population canadienne à ces émissions est plus élevée que celle de la plupart des habitants des autres pays. Chaque fois que nous montons le thermostat, démarrons la voiture, ouvrons le robinet d'eau chaude ou la porte du réfrigérateur, nous aggravons le problème. Nous pouvons intervenir positivement en modifiant nos habitudes et notre mode de vie, en nous penchant davantage sur la question et en adoptant une nouvelle attitude face à l'environnement.

Notre influence ne se limite pas aux questions de politique; il y a bien des gestes que nous pouvons faire dans notre vie de tous les jours pour alléger le fardeau qui pèse sur l'environnement. On trouvera à la fin du rapport une liste de ces gestes personnels.

En dernier ressort, toutefois, c'est le changement dans notre façon de percevoir nos ressources naturelles qui comptera le plus. L'environnement n'est pas une source inépuisable, ni une poubelle sans fond pour les déchets et détritiques de notre société industrielle. C'est plutôt un système dynamique, capable de se régénérer presque indéfiniment, tant que ses équilibres et ses interdépendances complexes sont respectés. Il nous faut vivre en harmonie avec les processus environnementaux. Au lieu d'exploiter la Terre, il nous faut la garder et la protéger.

Protéger l'atmosphère, un devoir personnel

À la maison

- Veillez à ce que la maison soit bien isolée.
- Ne montez pas trop le thermostat en hiver.
- En été, limitez les besoins en climatisation : installez des stores ou faites de l'ombre avec des arbres ou des auvents.
- Isolez le réservoir du chauffe-eau; bien isolé, il peut consommer jusqu'à 10 % d'énergie en moins.
- Si vous chauffez encore au mazout, envisagez la conversion au gaz naturel. Par unité d'énergie, ce dernier émet 40 % de carbone en moins (sous forme de dioxyde de carbone) que le mazout.
- Veillez à l'entretien de votre appareil de chauffage au mazout ou au gaz. Un appareil bien réglé consomme de 10 à 15 % moins d'énergie.
- À l'achat d'un nouvel appareil électroménager, comparez les taux de consommation énergétique et essayez de choisir l'appareil le plus efficace. Ainsi, le moins efficace des réfrigérateurs-congérateurs canadiens de 500 L, modèle deux portes, peut consommer en moyenne



Au Canada, l'industrie du transport est à l'origine d'environ 30 % des émissions de dioxyde de carbone.

1 200 kWh d'électricité par année, tandis que le plus efficace peut consommer moins de 650 kWh; on a aussi mis au point des prototypes qui n'exigent que 500 kWh par année.

- Envisagez de rendre votre éclairage plus efficace. Il existe maintenant des ampoules fluorescentes compactes utilisables dans les douilles standards pour ampoules à incandescence; elles sont quatre fois plus efficaces que ces dernières et durent huit à quinze fois plus longtemps. On a calculé que, pendant sa durée de vie, chaque ampoule fluorescente pourrait réduire de plus de 350 kg la production de dioxyde de carbone d'une centrale alimentée au charbon.
- Éteignez la lumière chaque fois que vous le pouvez. Pour alimenter une ampoule à incandescence de 100 W allumée 24 heures par jour pendant un an, une centrale alimentée au charbon émettrait environ 800 kg de dioxyde de carbone, ce qui représente environ 4 % des émissions par habitant de dioxyde de carbone attribuables à la combustion de combustibles fossiles.

Sur la route

- Entretenez votre voiture. Un véhicule dont le moteur est bien réglé et dont les pneus sont gonflés correctement peut consommer jusqu'à 10 % de carburant en moins.
- Roulez en gardant à l'esprit l'économie d'énergie. Ne dépassez pas la vitesse limite imposée, évitez les arrêts et démarrages brusques et planifiez vos déplacements pour suivre les itinéraires les plus efficaces. En outre, ne laissez pas trop tourner le moteur au ralenti : un véhicule à l'arrêt mais moteur en marche a un rendement de 0 km/L!
- Choisissez bien votre véhicule et faites de l'économie de carburant un facteur important de votre choix. Si possible, envisagez un système à carburant de remplacement, surtout au gaz naturel. Lorsqu'elle est disponible, choisissez l'essence-alcool (carburol).
- Pour aller au travail, pourquoi ne pas utiliser les transports en commun ou faire appel au covoiturage? Actuellement,

la voiture canadienne moyenne consomme environ 12 L de carburant aux 100 km. Si votre trajet aller et retour est de 20 km par jour, le déplacement est donc de 5 000 km par année. Sur la base de la consommation moyenne, il vous faudra 600 L de carburant, ce qui représente des émissions de plus de 1 400 kg de dioxyde de carbone, soit 7 % des émissions par habitant de dioxyde de carbone attribuables à la combustion de combustibles (carburants) fossiles. Le même trajet en autobus donne des émissions de moins de 200 kg par passager et par année. Fait intéressant, une amélioration de la consommation moyenne de seulement 1 L/100 km réduirait les émissions de dioxyde de carbone d'environ 3,3 millions de tonnes par année, ce qui correspond grosso modo à la fermeture de deux centrales modernes de 450 MW alimentées au charbon.

Dans vos habitudes

- Soyez sélectifs. Achetez des produits qui ne consomment pas trop d'énergie et qui peuvent être recyclés et réutilisés. Les bouteilles consignées, par exemple, consomment moins d'énergie que les bouteilles jetables.
- Participez aux programmes locaux de recyclage. La fabrication de produits à l'aide de matériaux recyclés demande beaucoup moins d'énergie. Le moulage sous pression d'une pièce d'aluminium faite de métal recyclé exige 95 % d'énergie en moins que celle fabriquée à partir de métal primaire.
- Faites connaître vos préoccupations environnementales aux représentants élus; encouragez-les à adopter les lois et règlements qui s'imposent.
- Enfin, demandez aux services publics locaux, au ministère de l'Énergie de votre province ou à Ressources naturelles Canada de vous donner d'autres renseignements et conseils sur l'économie d'énergie.

De toute évidence, chaque personne peut considérablement réduire sa contribution aux émissions de gaz à effet de serre (en particulier le dioxyde de carbone). Il faut aussi se souvenir que toute amélioration de l'efficacité énergétique aide à réduire l'émission de substances qui contribuent à d'autres problèmes environnementaux, comme les dépôts acides, la pollution de l'air des villes et l'appauvrissement de la couche d'ozone.

Sources des figures et des tableaux

- Boden, T.A., D.P. Kaiser, R.J. Sepanski et F.W. Stoss (réd.). 1994. *Trends '93: A Compendium of Data on Global Change*. ORNL/CDIAC-65. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.
- Critchfield, H.J. 1983. *General Climatology*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Folland, C.K., T.R. Karl et K. Ya. Vinnikov. 1990. « Variations et changement climatiques observés. » Dans : Houghton, J.T., G.J. Jenkins et J.J. Ephraums (réd.). *Rapport d'évaluation de l'IPCC*. Cambridge University Press, New York.
- Gates, W.I. 1985. « Modeling As a Means of Studying the Climate System. » Dans : MacCracken, M.C., et F.M. Luther (réd.). *Projecting the Effects of Increasing Carbon Dioxide*. U.S. Department of Energy, Washington.
- Griffith, J.F., et D. M. Driscoll. 1982. *Survey of Climatology*. Merrill, Columbus, Ohio.
- Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat. 1994. *Radiative Forcing of Climate Change: The 1994 Report of the Scientific Assessment Working Group of IPCC*. Cambridge University Press, New York.
- Lane, P., and Associates Limited. 1986. *Étude préliminaire des effets éventuels d'une hausse d'un mètre du niveau de la mer à Charlottetown, Île-du-Prince-Édouard*. Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Toronto.
- Liou, K.N. 1980. *An Introduction to Atmospheric Radiation*. Academic Press, New York.
- Lockwood, J.G. 1974. *World Climatology: An Environmental Approach*. Edward Arnold, Londres.
- London, J., et K. Angell. 1982. « The Observed Distribution of Ozone and Its Variations. » Dans : Bower, F.A., et R.B. Ward (réd.). *Stratospheric Ozone and Man. Vol. 1*. CRC Press, Boca Raton, Floride.
- MacCracken, M.S., et F.M. Luther (réd.). 1985. *Projecting the Effects of Increasing Carbon Dioxide*. U.S. Department of Energy, Washington.
- McKay, G.A., et H.G. Hengeveld. 1990. The Changing Atmosphere. Dans : Mungall, C., et D.J. McLaren (réd.). *Planet In Peril*. Oxford University Press, Toronto.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. 1993. *Geophysical Monitoring for Climatic Change. No. 21 : Summary Report 1992*. U.S. Department of Commerce, Washington.
- Organisation météorologique mondiale. 1994. *Scientific Assessment of Ozone Depletion, 1994*. Genève.
- Programme des Nations Unies pour l'environnement. 1987. *The Ozone Layer*. UNEP/GEMS Environmental Library No. 2. Nairobi.
- Rizzo, B., Environnement Canada. 1990. *Communication personnelle*.
- Sanderson, M. 1987. *Répercussions d'un changement du climat sur l'agriculture et la production d'électricité dans les Grands Lacs*. CCD 87-03. Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Toronto.
- Stocks, B., Ressources naturelles Canada. 1994. *Communication personnelle*.
- United Kingdom Meteorological Office. 1994. *Communication personnelle*.
- Warrick, R., et J. Oerlemans. 1990. « Élévation du niveau de la mer. » Dans : Houghton, J.T., G.J. Jenkins et J.J. Ephraums (réd.). *Rapport d'évaluation de l'IPCC*. Cambridge University Press, New York.
- Williams, G.D.V., R.A. Fautley, K.H. Jones, R.B. Stewart et E.E. Wheaton. 1987. « Estimating the Effects of Climatic Change on Agriculture in Saskatchewan, Canada. » Dans : Parry, M.L., T.R. Carter et N.T. Konijn (réd.). *The Impacts of Climate Variations on Agriculture, Vol. 1*. Reidel, Dordrecht.
- World Resources Institute. 1992. *World Resources, 1992-93: A Guide to the Global Environment*. Oxford University Press, New York.

Quelques ouvrages utiles

- Bazzaz, F.A., et E.d. Fajer. 1992. « Plant Life in a CO₂-Rich World. » *Scientific American*, 266 (1):68–77.
- Broecker, W.S., et G.H. Denton. 1990. « What Drives Glacial Cycles? » *Scientific American*, 262 (1):48–56.
- Bruce, J.P. 1990. *The Atmosphere of the Living Planet Earth*. WMO–735. Organisation météorologique mondiale, Genève.
- Charlson, R.J., et T.M.L. Wigley. 1994. « Sulphate Aerosol and Climate Change. » *Scientific American*, 270 (2):48–57.
- Conseil du programme climatologique canadien. 1993. *Le changement climatique et ses répercussions sur le Canada : Le point de vue scientifique, mise à jour, 1993*. Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Toronto.
- Environnement Canada. 1993. *Une question de degrés : l'abc du réchauffement planétaire*. Ottawa.
- Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat. 1994. *Radiative Forcing of Climate Change: The 1994 Report of the Scientific Assessment Working Group of IPCC*. Cambridge University Press, New York.
- Houghton, J.T., G.J. Jenkins et J.J. Ephraums (réd). 1990. *Rapport d'évaluation de l'IPCC*. Cambridge University Press, New York.
- Houghton, J.T., B.A. Callander et S.K. Varney. 1992. *Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, New York.
- Jean, M. 1990. « Conséquences d'un changement climatique sur le système du Saint-Laurent : éléments d'une problématique. » *Le Climat*, 8 (1):49–74.
- Jones, P.D., et T.M.L. Wigley. 1990. « Global Warming Trends. » *Scientific American*, 263 (2):84–91.
- Leggett, J. 1990. *Global Warming: The Greenpeace Report*. Oxford University Press, New York.
- Organisation météorologique mondiale. 1989. *Actes de la Conférence : L'Atmosphère en évolution, Toronto, juin 1988*. Organisation météorologique mondiale, Genève.
- Pollack, H.N., et D.S. Chapman. 1993. « Underground Records of Changing Climate. » *Scientific American*, 268 (6):44–53.
- Roan, S. 1989. *Ozone Crisis*. Wiley, New York.
- Schneider, S.H. 1987. « Climate Modelling : Will the “Greenhouse Effect” Bring On Another Dust Bowl? » *Scientific American*, 256 (5):72–80.
- Schneider, S.H. 1989. *Global Warming: Are We Entering the Greenhouse Century?* Sierra Club Books, San Francisco.
- Service de l'environnement atmosphérique. 1994. *Modélisation du système climatique de la terre*. Environnement Canada, Toronto.
- Tegart, W.J. McG., G.W. Sheldon et D.C. Griffiths. 1990. *Climate Change: The IPCC Impacts Assessment*. Australian Government Publishing House, Canberra.
- World Resources Institute. 1992. *World resources, 1992–93: A Guide to the Global Environment*. Oxford University Press, New York.

Liste des rapports sur l'état de l'environnement

N° 89-1 : Les polluants dans le milieu marin de la Colombie-Britannique – Rapport sur l'état des connaissances.

B.H. Kay. Protection de l'environnement, Région du Pacifique et du Yukon, Environnement Canada. 1989.

N° 89-2 : La nature aux abois – Les espèces menacées de disparition au Canada. J.A. Burnett, C.T. Dauphiné Jr., S.H. McCrindle et T. Mosquin. Service canadien de la faune, Environnement Canada. 1989.

N° 90-1 : Perspective canadienne sur la pollution atmosphérique. J. Hilborn et M. Still. État de l'environnement et Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada. 1990.

N° 90-2 : Les contaminants chez les oiseaux de mer du Canada. David Noble. État de l'environnement et Service canadien de la faune, Environnement Canada. 1990.

N° 91-1 : Le point sur l'établissement d'un ensemble national d'indicateurs environnementaux au Canada. Groupe de travail sur les indicateurs, État de l'environnement, Environnement Canada. 1991.

N° 91-2 : Comprendre l'atmosphère en évolution : Revue de la science de base et des implications d'un changement du climat et d'un appauvrissement de la couche d'ozone. H. Hengeveld. Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada. 1991.

N° 92-1 : L'état de l'environnement dans le bassin inférieur du fleuve Fraser. Environnement Canada et ministère de l'Environnement, des Terres et des Parcs de la Colombie-Britannique. 1992.

N° 92-2 : L'état du climat au Canada : les variations de la température au Canada, 1895-1991. D.W. Gullett et W.R. Skinner. Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada. 1992.

N° 95-1 : L'état du climat au Canada : la surveillance de la variabilité et du changement climatiques. Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada. 1995.

