

Les fondements scientifiques du changement climatique sont-ils valides?

Rapport spécial à l'Assemblée législative de l'Ontario

**Présenté par Gord Miller,
Commissaire à l'environnement de l'Ontario
19 novembre, 2002**



1075 RUE BAY, BUREAU 605, TORONTO, ON, M5S 2B1



Gord Miller, B.Sc, M.Sc
Commissioner

Gord Miller, B.Sc, M.Sc.
Commissaire

Le 19 novembre 2002

L'honorable Gary Carr
Président de l'Assemblée législative
Édifice de l'Assemblée législative, salle 180
Assemblée législative
Province de l'Ontario
Queen's Park

Monsieur le Président,

Conformément au paragraphe 58 (4) de la *Charte des droits environnementaux de 1993*, je vous présente ci-joint un Rapport spécial du Commissaire à l'environnement de l'Ontario pour considération par l'Assemblée législative.

Ce rapport spécial concerne les fondements scientifiques du changement climatique. Depuis les deux derniers mois, j'ai été convaincu que la question des évidences scientifiques concernant le changement climatique est devenue une question urgente pour les législateurs ontariens ainsi que pour le public ontarien. Il y a eu également nombreuses affirmations dans les médias qu'il y a peu de fondements scientifiques au sujet du changement climatique, et que les approches «lentes» et «d'affaires comme à l'habitude» seraient donc appropriées. Je présente donc ce rapport pour donner aux membres de la législature et du public mon évaluation des fondements scientifiques du changement climatique. J'espère que le rapport que je présente aujourd'hui éclairera et aidera les décisionnaires des politiques ontariennes à se rendre à la prochaine étape de la discussion.

Je vous prie d'agréer, Monsieur le Président, l'assurance de ma haute considération.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'G. Miller'.

Gord Miller
Commissaire à l'environnement de l'Ontario



Table des matières

Introduction.....	1
Changements observés.....	2
<i>Hausse des concentrations de gaz à effet de serre.....</i>	<i>2</i>
<i>Hausse des températures à l'échelle mondiale.....</i>	<i>3</i>
<i>Températures observées au cours des mille dernières années</i>	<i>3</i>
<i>Les données des satellites n'invalident pas les données sur le réchauffement de la planète.....</i>	<i>4</i>
<i>Recul des glaciers</i>	<i>4</i>
<i>Réduction des manteaux nivaux et glaciels.....</i>	<i>4</i>
<i>Élévation plus rapide du niveau de la mer</i>	<i>5</i>
<i>Résumé des changements observés.....</i>	<i>5</i>
Causes des changements observés	5
<i>Raisons de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre</i>	<i>5</i>
<i>Facteurs contribuant au changement climatique.....</i>	<i>6</i>
<i>Contributions de l'être humain au changement climatique.....</i>	<i>7</i>
<i>Débats à propos des preuves</i>	<i>7</i>
<i>Débats à propos des facteurs naturels :</i>	<i>8</i>
<i>Causes de la récente élévation du niveau de la mer</i>	<i>10</i>
Projection des futurs changements climatiques	10
Conclusion	12

ANNEXE A : FIGURES

- Figure 1.** Variations de concentrations atmosphériques du dioxyde de carbone et méthane depuis 400,000 années jusqu'à présent
- Figure 2.** Variations des moyennes de température de surface au niveau global durant la période 1856-2000
- Figure 3.** Variations des moyennes de température de surface de l'hémisphère Nord
- Figure 4.** Forçage radiatif moyen global du système climatique en l'an 2000 par rapport à 1750
- Figure 5.** Simulation de la moyenne annuelle au niveau global de température de surface
- Figure 6.** Projections pour les émissions de dioxyde de carbone pour la période de 2000-2100

ANNEXE B : ANNEXE TECHNIQUE

Les fondements scientifiques du changement climatique sont-ils valides?

Rapport spécial à l'Assemblée législative de l'Ontario

Introduction

À titre de commissaire à l'environnement de l'Ontario (CEO), j'ai pour mandat de publier des rapports spéciaux sur des questions d'une urgence particulière. Au cours des deux derniers mois, j'ai acquis la conviction que la question des fondements scientifiques du changement climatique a pris un caractère urgent pour les législateurs et le public ontariens.

Nous sommes actuellement plongés dans un débat national sur les solutions que l'on doit préconiser face au changement climatique – un débat où l'Ontario, qui a une population importante et une solide assise manufacturière, et produit une grande quantité de gaz à effet de serre, joue un rôle clé. Récemment, de nombreuses assertions ont été faites dans les médias selon lesquelles les fondements scientifiques du changement climatique étaient plutôt incertains et l'adoption d'une approche prudente ou axée sur le statu quo était donc appropriée.

Par ailleurs, d'autres voix, d'un bout à l'autre de l'éventail politique, réclamaient que l'on réduise dans les plus brefs délais les émissions de gaz à effet de serre. Par exemple, un éditorial publié récemment dans l'hebdomadaire des affaires *The Economist* soutenait que le changement climatique est la principale raison pour laquelle une révolution énergétique est nécessaire. Selon cet éditorial, le meilleur moyen pour les gouvernements de s'attaquer à ce problème véritable (et à long terme) est de signifier très clairement au monde entier qu'il faut réduire considérablement la combustion de carbone pour assurer notre avenir.

La controverse à l'égard des fondements scientifiques du changement climatique est un élément fondamental du processus politique. Si les fondements scientifiques du changement climatique ne sont pas valides, il n'y a alors aucune raison de modifier les politiques. Cependant, si ces fondements scientifiques sont valides, l'adoption d'une approche axée sur le statu quo aura de graves conséquences pour notre société. Il nous faudrait, à tout le moins, tenir compte de ces conséquences dans notre planification économique, sociale et environnementale. Par ailleurs, la question de la validité des fondements scientifiques du changement climatique semble désarmer de nombreux décideurs des secteurs public et privé. D'un côté, ils n'ont pas vraiment le temps d'étudier en profondeur les nombreuses questions techniques pertinentes, et d'un autre côté, ils sont assaillis tous les jours par de nouvelles conclusions et de nouveaux arguments et contre-arguments. Il est très difficile de prendre de bonnes décisions dans de telles circonstances.

J'espère que le rapport que je rends public aujourd'hui éclaircira dans une certaine mesure ce débat et incitera les décideurs ontariens à le poursuivre. Ce rapport spécial examine les principaux arguments scientifiques concernant le changement climatique, et offre une opinion quant à la validité de ces arguments. Bien que je ne veuille pas préjuger de la politique que devrait adopter l'Ontario face au changement climatique avant que le gouvernement ne prenne

une décision, je crois qu'il est crucial que j'examine ces arguments scientifiques au profit des membres de l'Assemblée législative et de la population de l'Ontario et que j'en rende compte.

Mon rapport est principalement axé sur les constatations du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) des Nations Unies dans son troisième rapport d'évaluation, publié en 2001 (rapport de 2001 du GIEC). Le GIEC est un organisme composé de scientifiques du monde entier créé en 1988 par les Nations Unies sous l'égide du Programme des Nations Unies pour l'environnement et de l'Organisation météorologique mondiale. Le GIEC a pour mandat de fournir aux décideurs une évaluation objective des données scientifiques et techniques sur le changement climatique, sur ses répercussions environnementales et socio-économiques et sur ses solutions possibles. Plusieurs centaines de scientifiques en provenance de nombreux pays (dont le Canada) participent à la préparation et à l'examen des rapports du GIEC. Ces rapports représentent l'évaluation officielle de la communauté scientifique sur les fondements scientifiques du changement climatique et sur l'incidence de l'être humain sur celui-ci. Le GIEC a publié des évaluations en 1990, 1995 et, plus récemment, en 2001, chaque évaluation étant le résultat de recherches de grande envergure effectuées au cours des cinq années précédentes.

Mon rapport fait également état des conclusions de plusieurs publications récentes du National Research Council (NRC) des États-Unis en la matière, et plus particulièrement du rapport rédigé par le NRC en juin 2001. La rédaction de ce rapport avait été demandée par l'administration du président américain George W. Bush, qui voulait obtenir l'avis du NRC sur les fondements scientifiques du changement climatique, de même qu'une critique indépendante des constatations du GIEC.

Dans les pages qui suivent, j'ai essayé de résumer les plus récentes constatations du GIEC, de même que les principaux débats et incertitudes visant les fondements scientifiques du changement climatique. J'ai également joint à mon rapport une longue annexe technique, qui comporte des renseignements plus détaillés sur ces mêmes sujets.

Changements observés

Hausse des concentrations de gaz à effet de serre

Depuis plusieurs décennies maintenant, les scientifiques ont observé une hausse des concentrations de plusieurs gaz à effet de serre dans l'atmosphère, plus particulièrement le dioxyde de carbone, le méthane, l'oxyde nitreux et l'ozone troposphérique. Ces observations, qui sont issues en partie d'un programme de surveillance continue des concentrations de dioxyde de carbone mis en place à la fin des années 1950, ne font l'objet d'aucune contestation scientifique. Les concentrations de dioxyde de carbone et de méthane sont plus élevées maintenant qu'elles ne l'ont été au cours des 420 000 dernières années (Figure 1). Récemment, les concentrations d'autres gaz à effet de serre ont également augmenté de manière abrupte. Au cours de l'ère industrielle, les concentrations de dioxyde de carbone ont augmenté de plus de 30 pour 100, celles de méthane, de plus de 150 pour 100, et celles d'oxyde nitreux, de plus de 15 pour 100.

Pour comparer la composition de l'atmosphère actuelle avec celle du passé lointain, les chercheurs ont analysé des carottes de glace tirées des calottes glacières massives et anciennes qui recouvrent l'Antarctique et le Groenland. Grâce aux bulles d'air emprisonnées dans ces carottes de glace, il est possible d'examiner les variations de l'atmosphère sur une période remontant à des centaines de milliers d'années. En effet, les chercheurs peuvent mesurer les concentrations de gaz à effet de serre dans ces bulles d'air et suivre avec confiance l'évolution de l'atmosphère terrestre au fil des ans.

Hausse des températures à l'échelle mondiale

Les scientifiques ont conclu que la température mondiale moyenne de la surface terrestre avait augmenté d'environ 0,6° Celsius au cours des cent dernières années. Comme nous n'avons pas de conception empirique de ce qu'est la température mondiale moyenne, nous avons tendance à nous fier à notre propre expérience de tous les jours avec le temps, et c'est pourquoi un changement d'un demi-degré peut nous sembler minime. Cependant, la température mondiale moyenne est une méthode de mesure du changement climatique à l'échelle mondiale, et vu sous cet angle, le changement observé est exceptionnellement important.

Depuis l'invention du thermomètre, des milliers de stations terrestres partout dans le monde et des milliers de vaisseaux en mer ont mesuré régulièrement la température. Les instituts de recherche sur le climat ont compilé ces températures dans de très vastes bases de données publiques, qui ont été largement dépouillées par des chercheurs du monde entier. La très grande majorité des scientifiques s'entendent pour dire que l'augmentation observée dans la température mondiale moyenne à la surface terrestre au cours des cent dernières années est réelle (Figure 2). Même les scientifiques qui mettent franchement en doute le lien entre l'être humain et le changement climatique conviennent que la température mondiale moyenne a augmenté sensiblement. On soutient parfois que la chaleur produite par les immeubles et les véhicules – effet que l'on décrit sous le nom d'effet d'îlot thermique urbain – influe sur les températures mesurées en milieu urbain, et que le réchauffement observé est attribuable à ces effets localisés plutôt qu'à un phénomène réellement mondial. Cependant, le GIEC a étudié cette question et a souligné depuis 1992 que l'effet d'îlot thermique urbain ne peut avoir qu'une incidence très limitée sur le réchauffement observé.

Températures observées au cours des mille dernières années

Le rapport de 2001 du GIEC note qu'il est probable que l'augmentation de température survenue dans l'hémisphère nord au cours du XX^e siècle ait été la plus importante augmentation de température séculaire des mille dernières années (Figure 3). Pour estimer les températures mondiales d'avant l'invention du thermomètre, les chercheurs ont analysé plusieurs types de phénomènes naturels sur lesquels la température a une incidence, comme la croissance des anneaux des arbres, des calottes polaires et des coraux tropicaux, phénomènes décrits sous le nom d'indicateurs substitutifs de la température. Pour en arriver à une température définitive, les chercheurs établissent une corrélation entre les indicateurs substitutifs de la température et les températures réelles des cent dernières années environ, puis procèdent à une extrapolation fondée sur cette corrélation en remontant dans le temps. Étant donné que les données sur les anneaux des arbres, les calottes polaires et les coraux tropicaux sont recueillies dans des régions

très différentes du point de vue géographique, les chercheurs peuvent combiner ces indicateurs pour reconstituer sur une grande échelle les tendances passées de réchauffement de la planète.

Comparativement aux tendances des températures reconstituées des mille dernières années, l'augmentation des températures au cours du dernier siècle présente un caractère tout à fait inhabituel. Au cours des mille dernières années, il y a eu une période de réchauffement variable à l'échelon régional décrite sous le nom de période de réchauffement médiéval et, plus récemment, une période de refroidissement portant le nom de Petit âge glaciaire. Certains soutiennent que la période de réchauffement actuelle pourrait être une autre variation naturelle. Cependant, le rapport de 2001 du GIEC en arrive à la conclusion que ces épisodes de réchauffement et de refroidissement semblaient être des phénomènes régionaux, tandis que la hausse actuelle des températures est observée simultanément dans de nombreuses régions de la planète.

Les données des satellites n'invalident pas les données sur le réchauffement de la planète

Depuis 1979, les satellites ont recueilli des données pouvant servir à calculer les températures de l'atmosphère à différentes altitudes. Ces données ont révélé que la basse atmosphère ne s'était pas réchauffée autant que la surface de la Terre, ce qui a suscité un débat parmi les scientifiques, certains mettant en question la validité des données recueillies par les satellites, et d'autres, la validité des températures enregistrées à la surface de la Terre. Le NRC a mis sur pied un comité afin d'étudier cette question. En 2000, ce comité a conclu que les données recueillies par les satellites n'invalidaient d'aucune façon les tendances des températures à la surface. Le comité en est également arrivé à la conclusion qu'il y avait probablement une différence réelle entre les tendances des températures à la surface et dans la basse atmosphère. Parmi les causes possibles citées par le comité pour expliquer les températures relativement plus froides de la basse atmosphère, on trouve les éruptions volcaniques et l'appauvrissement anthropique de l'ozone stratosphérique.

Recul des glaciers

Le rapport de 2001 du GIEC indique que les glaciers dans la plupart des régions de la planète ont enregistré un « bilan massique négatif » au cours des 20 dernières années. En d'autres termes, ils ont perdu davantage de masse en moyenne qu'ils n'en ont accumulée. De plus, grâce aux mesures de la taille et de la longueur des glaciers et à l'analyse des moraines, il a été maintes et maintes fois démontré que la plupart des glaciers de montagne avaient reculé au cours des 100 dernières années. Certains glaciers avancent, par exemple en Norvège et en Nouvelle-Zélande, mais le rapport de 2001 du GIEC note que cette progression est due à une augmentation inhabituelle des précipitations.

Réduction des manteaux nivaux et glaciers

Dans de nombreuses régions de la planète, les chercheurs ont observé une réduction dans le manteau nival et une fonte plus précoce au printemps de la glace sur les lacs et rivières. Le rapport de 2001 du GIEC note que le manteau nival annuel dans l'hémisphère nord a diminué d'environ 10 pour 100 depuis 1996. La glace marine recouvre environ cinq pour cent de la surface terrestre. Tant l'épaisseur que l'ampleur de la glace marine influent sur l'interaction entre l'atmosphère et les océans. Au cours des trois dernières décennies, l'ampleur de la glace

marine arctique a diminué d'environ trois pour cent par décennie, tandis que son épaisseur minimale estivale a diminué de près de 40 pour 100. En outre, le pergélisol se réchauffe dans de nombreuses régions. Par exemple, en Alaska, le pergélisol s'est réchauffé de 2° à 4° Celsius au cours du dernier siècle.

Élévation plus rapide du niveau de la mer

Les marégraphes mesurent le niveau de la mer par rapport à la terre où l'appareil se trouve. Le mouvement de la surface terrestre et les variations dans la hauteur du niveau de la mer peuvent avoir une incidence sur les changements dans le niveau moyen de la mer. Dans de nombreux endroits, la surface terrestre, libérée du poids de la dernière glaciation, se relève encore, et les chercheurs doivent tenir compte de cela lorsqu'ils interprètent les données tirées des marégraphes.

Le rapport de 2001 du GIEC estime que le taux moyen d'élévation du niveau de la mer, qui était de 0,1 à 0,2 millimètre par année au cours des 3 000 dernières années, s'est intensifié au cours du XX^e siècle pour atteindre de 1 à 2 millimètres par année. Il s'agit là d'une augmentation représentant un facteur de dix. De plus, le taux moyen d'élévation du niveau de la mer au cours du XX^e siècle a été plus élevé qu'au cours du XIX^e siècle.

Résumé des changements observés

Les concentrations de gaz à effet de serre sont plus élevées maintenant qu'elles ne l'ont jamais été au moins au cours des 420 000 dernières années, et ont augmenté à un taux sans cesse grandissant depuis la révolution industrielle. Nombre des changements observés dans le climat et d'autres indicateurs sont liés les uns aux autres et corroborent la théorie du changement climatique. Par exemple, les températures enregistrées à la surface de la Terre et de la mer ont augmenté de manière uniforme. Le recul généralisé des glaciers de montagne correspond aux augmentations des températures à l'échelle mondiale. Les réductions dans le manteau nival et dans le volume des glaces dans les lacs et rivières et dans la mer Arctique sont reliées aux augmentations des températures dans l'hémisphère nord. Le GIEC conclut, dans son rapport de 2001, que ces tendances sont uniformément et manifestement attribuables à l'augmentation des températures de surface à l'échelle de la planète qui a eu lieu au cours du dernier siècle.

Causes des changements observés

Raisons de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre

Les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère ont augmenté sensiblement, l'être humain étant clairement la cause de ces augmentations. Cette question ne fait essentiellement l'objet d'aucun débat au sein de la communauté scientifique, et plusieurs sources de données indépendantes confirment ce phénomène. Premièrement, le taux d'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre au cours du siècle dernier correspond au taux d'émissions causées par l'être humain. Deuxièmement, l'oxygène atmosphérique a diminué au même rythme que les émissions de dioxyde de carbone ont augmenté, et ce, parce que la combustion de carburants fossiles brûle de l'oxygène. Troisièmement, la proportion d'isotopes du carbone dans l'atmosphère a changé, ce qui veut dire que l'atmosphère s'enrichit de carbone provenant de carburants fossiles plutôt que de sources naturelles. Le GIEC estime que de 70 à 90 pour 100 de

l'augmentation des émissions de dioxyde de carbone est attribuable à la combustion de carburants fossiles, le reste étant dû aux différences dans l'aménagement du territoire, en particulier la déforestation. Le NRC convient également que l'être humain est responsable de l'augmentation des concentrations de dioxyde de carbone.

Avant la révolution industrielle, le cycle naturel du carbone sur Terre avait essentiellement atteint un équilibre, de vastes quantités de carbone étant continuellement circulées dans l'atmosphère, les océans, les sols et la biomasse de la planète. Comparativement aux quantités de carbone visées par ce cycle naturel, les émissions anthropiques de dioxyde de carbone sont minimales, mais elles ont perturbé un cycle qui avait presque atteint un équilibre. D'autres gaz à effet de serre proviennent de sources naturelles et humaines, mais ce sont les émissions produites par l'être humain qui ont entraîné l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Certains gaz à effet de serre, comme le chlorofluorocarbure, sont entièrement anthropiques.

Facteurs contribuant au changement climatique

Nous avons discuté du fait que la température moyenne de la planète et que les concentrations de gaz à effet de serre avaient augmenté. Cependant, la question de savoir si la hausse de la température mondiale moyenne est attribuable à l'augmentation observée dans les concentrations de gaz à effet de serre demeure. Plusieurs facteurs externes, tant naturels qu'anthropiques, peuvent influencer sur le changement climatique, et ces facteurs se font souvent tous sentir simultanément. Ces facteurs, qui peuvent altérer l'équilibre qui existe entre l'énergie entrante et l'énergie sortante dans l'atmosphère terrestre, sont décrits sous le nom de « forçages radiatifs » par les climatologues. Un forçage radiatif positif entraîne un réchauffement, tandis qu'un forçage radiatif négatif produit un refroidissement. Parmi les plus importants forçages radiatifs, on trouve les gaz à effet de serre, les aérosols, le forçage solaire (variation du débit solaire) et les éruptions volcaniques. Les forçages radiatifs sont mesurés en watts par mètre carré.

Le rapport de 2001 du GIEC résume l'importance relative des différents forçages radiatifs au cours des derniers siècles et en arrive à la conclusion que les gaz à effet de serre, plus particulièrement le dioxyde de carbone, sont les forçages radiatifs positifs ayant eu le plus d'incidence (Figure 4). Le forçage solaire n'a contribué qu'à une infime fraction du réchauffement de la planète, comparativement aux gaz à effet de serre. Parallèlement, plusieurs facteurs ont contribué à un refroidissement, plus particulièrement les aérosols sulfatés, les éruptions volcaniques, les bioaérosols et l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique.

Le rapport de 2001 du GIEC a également évalué le niveau de compréhension des scientifiques à l'égard des répercussions de chaque forçage radiatif. Le rapport de 2001 note que le niveau de compréhension des scientifiques à l'égard de la plupart des gaz à effet de serre est excellent, que des mesures précises des concentrations de ces gaz sont disponibles et que les propriétés radiatives de ces gaz sont bien connues. Par ailleurs, les scientifiques ont une compréhension moyenne des propriétés radiatives de l'ozone. Enfin, puisque d'importantes incertitudes

demeurent quant aux aérosols et à leurs incidences sur les nuages et le forçage solaire, le GIEC reconnaît que le niveau de compréhension des scientifiques à leur égard est très faible.

Contributions de l'être humain au changement climatique

Le rapport de 2001 du GIEC conclut que de nouvelles preuves plus solides que celles des rapports antérieurs viennent corroborer la thèse voulant que le gros du réchauffement observé au cours des 50 dernières années soit attribuable à l'être humain. Le rapport de 2001 ajoute que de nouvelles estimations de la réaction du système climatique au forçage naturel et anthropique ont été réalisées et que de nouvelles techniques de détection ont été employées. Les activités de détection et les études d'attribution ont constamment décelé, dans les données climatiques des 35 à 50 dernières années, le signe de l'influence de l'être humain.

Pour faire poindre l'influence de l'être humain sur le climat, les chercheurs comparent différents modèles de températures à l'échelle planétaire avec les températures observées à l'échelle mondiale au cours des dernières décennies (Figure 5). Lorsque les modèles établis ne simulent que l'influence des variations solaires et des éruptions volcaniques pour la période en question, les températures tirées de ces modèles ne concordent pas vraiment avec les températures observées. Lorsque les modèles ne simulent que les influences de l'être humain (gaz à effet de serre, appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique et aérosols sulfatés), il est un peu plus facile d'établir des concordances avec les températures observées. Cependant, c'est lorsque l'on combine les influences naturelles et anthropiques que l'on obtient les concordances les plus proches.

Bien qu'il n'existe aucune preuve absolue voulant que les gaz à effet de serre soient la cause du réchauffement de la planète, il n'en existe pas moins des preuves solides. Le NRC a remis en juin 2001 un rapport au président des États-Unis qui résumait les vues actuelles des scientifiques sur cette question. Dans ce rapport du NRC, il est indiqué que la conclusion du GIEC voulant que, selon toute vraisemblance, le gros du réchauffement observé au cours des 50 dernières années soit attribuable à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre correspond aux conclusions actuelles de la communauté scientifique sur cette question.

Débats à propos des preuves

L'importance des différentes influences exercées sur le changement climatique observé fait l'objet d'un certain nombre de débats. Certains se demandent comment le dioxyde de carbone, un gaz qui représente moins d'un pour cent de tous les gaz atmosphériques, pourrait être la cause de la hausse des températures à l'échelle mondiale. L'azote et l'oxygène, qui ensemble représentent 99 pour 100 des gaz atmosphériques, sont essentiellement perméables à la radiation, et ne sont donc pas des gaz à effet de serre. Cependant, il existe de nombreuses substances chimiques et biologiques pouvant avoir une forte incidence sous forme de traces.

D'autres personnes croient que les preuves concernant l'importance des différents facteurs pertinents sont conflictuelles. Par exemple, le refroidissement qui a eu lieu dans l'hémisphère nord de 1946 à 1975 a incité certaines personnes à prétendre que cet épisode, qui a coïncidé avec la hausse des émissions de gaz à effet de serre, infirme la théorie selon laquelle l'être humain est responsable du réchauffement de la planète. Cependant, le NRC croit plutôt qu'il est

possible que les aérosols sulfatés, dont les concentrations étaient plus élevées à ce moment-là, aient entraîné le refroidissement de la planète au cours de cette période, contrecarrant ainsi le réchauffement provoqué par la hausse des concentrations de gaz à effet de serre.

Par ailleurs, le fait que les niveaux de dioxyde de carbone étaient beaucoup plus élevés dans le passé lointain de la Terre a incité certains observateurs à se demander pourquoi une augmentation relativement minime de dioxyde de carbone serait maintenant source de problèmes. Il est vrai que, tout comme le climat naturel de la Terre a connu des variations dans le passé, les niveaux de dioxyde de carbone ont également varié. Les niveaux de dioxyde de carbone étaient jusqu'à 20 fois plus élevés il y a 150 à 200 millions d'années, mais le climat était beaucoup plus chaud et le niveau de la mer, beaucoup plus élevé. Au cours des récentes fluctuations glaciaires et interglaciaires qui ont eu lieu dans notre passé plus récent, les niveaux de dioxyde de carbone ont varié entre 180 et 300 ppmv, mais se sont situés à un niveau relativement stable d'environ 270 à 290 ppmv entre la fin de la dernière période glaciaire jusqu'au début de l'ère industrielle, au moment où ils ont commencé à grimper en flèche (pour se situer actuellement à un niveau de 370 ppmv) en raison des émissions découlant des activités humaines. Les civilisations humaines se sont développées dans des conditions atmosphériques où le niveau de dioxyde de carbone atteignait de 270 à 290 ppmv.

La communauté scientifique débat également de la façon d'interpréter les preuves géologiques reliant les concentrations de dioxyde de carbone aux températures – et plus particulièrement de la question de savoir si les augmentations des concentrations de dioxyde de carbone ont alimenté ou simplement amplifié des hausses de température à une période ou une autre de notre lointain passé. Personne ne conteste toutefois le fait que les carottes de glace de l'Antarctique révèlent un lien remarquable entre les niveaux de dioxyde de carbone et les températures, ceux-ci ayant augmenté et diminué simultanément de la même façon au cours des 420 000 dernières années.

Certains des opposants à la thèse du changement climatique ont également soulevé des doutes quant à la fiabilité des modèles climatiques, les premiers modèles ayant en général prédit des hausses plus prononcées des températures que ce qui a été observé au cours du dernier siècle. Cependant, on soupçonne depuis longtemps que les aérosols refroidissent sensiblement le climat. Lorsque l'incidence des aérosols est intégrée aux modèles climatiques, les températures qu'ils produisent sont conformes aux températures observées.

Débats à propos des facteurs naturels :

Le soleil

Certains sceptiques croient que des facteurs naturels peuvent contribuer de façon substantielle au réchauffement de la planète. L'influence variable du soleil est sans cesse soulignée dans les débats sur les causes du changement climatique. L'irradiation solaire varie selon un cycle de 11 années, et peut augmenter légèrement d'un cycle à l'autre. Cependant, le rapport de 2001 du GIEC conclut que le forçage solaire est très faible (entre + 0,1 et + 0,5 watt par mètre carré) comparativement au forçage des gaz à effet de serre (+ 2,43 watts par mètre carré avec un niveau d'incertitude de 10 pour 100). L'irradiation

solaire a été directement observée par satellite au cours des 22 dernières années et présente une variation minimale de moins de 0,1 pour 100. Le GIEC précise que le forçage solaire peut avoir contribué en partie au réchauffement observé au cours de la première moitié du XX^e siècle, mais y a très peu contribué dans la deuxième moitié.

La variation de l'irradiation solaire ne pourrait avoir une incidence majeure sur le climat que si elle était amplifiée d'une certaine façon par un autre mécanisme. On a suggéré que les rayons cosmiques et leurs répercussions possibles sur les nuages pourraient être l'un de ces mécanismes. Cependant, le GIEC a étudié cette question et a conclu que l'impact des rayons cosmiques sur les nuages n'a pas été démontré.

Hydrate de méthane

L'hydrate de méthane est un solide cristallin qui se forme naturellement dans des dépôts sur le sol des régions polaires et dans des sédiments marins en dessous du plancher océanique. On a formulé une hypothèse voulant que le rejet naturel de grandes quantités d'hydrate de méthane puisse contribuer au changement climatique. Cependant, une étude réalisée par le United States Geological Survey en 1999 a réfuté cette théorie. Le rapport de 2001 du GIEC souligne qu'il n'existe aucune preuve de rejets massifs et rapides d'hydrate de méthane dans le passé, et que l'hydrate de méthane ne représente probablement pas plus de deux pour cent de toutes les sources actuelles naturelles et anthropiques de méthane. De toute façon, le méthane ne contribue qu'à environ 20 pour 100 du forçage radiatif total attribuable aux gaz à effet de serre.

Autres causes naturelles possibles

Certaines personnes se demandent si les variations dans l'orbite terrestre ne pourraient pas être responsables du réchauffement actuel de la planète. De lentes variations régulières dans l'axe de rotation et dans l'orbite de la Terre (les cycles de Milankovitch) ont joué un rôle important dans la progression et le recul des glaciers au cours des dernières périodes glaciaires. Cependant, ces variations surviennent très lentement, et il faut des milliers d'années avant que des changements d'envergure ne deviennent apparents.

On a également suggéré que la réorganisation interne des courants atmosphériques et océaniques était en partie responsable du récent réchauffement de la planète. Il s'agirait là d'une coïncidence remarquable, ce phénomène se produisant au même moment où une augmentation rapide des gaz à effet de serre à rétention thermique a lieu dans l'atmosphère, mais, apparemment, sans que ces augmentations de gaz à effet de serre n'aient d'incidence sur le climat. De plus, cette théorie ne semble pas concorder avec les observations effectuées. En effet, il a été directement observé que les océans se sont réchauffés en même temps qu'il y a eu pénétration descendante de chaleur à partir de la surface. De récentes études ont révélé que les océans agissaient probablement comme puits thermiques plutôt que comme sources de chaleur.

Causes de la récente élévation du niveau de la mer

Tel que noté précédemment, le niveau de la mer a augmenté plus rapidement au cours du XX^e siècle qu'au cours de siècles récents. Le dernier rapport du GIEC note qu'il est fort probable que le réchauffement survenu au XX^e siècle ait sensiblement contribué à l'élévation observée du niveau de la mer. Pour déterminer si l'être humain est en partie ou largement responsable de ce changement, les chercheurs ont évalué et quantifié de nombreux facteurs qui contribuent à l'élévation du niveau de la mer, comme l'expansion thermique de l'eau et la fonte des glaciers et des calottes polaires.

Le GIEC a conclu que l'expansion thermique était l'une des principales causes de l'élévation du niveau de la mer au XX^e siècle, et qu'elle y apportera la contribution la plus importante au cours des cent prochaines années. L'expansion thermique est attribuable à la hausse de la température de l'eau océanique, qui fait augmenter son volume. Les calottes polaires continentales n'ont que très peu contribué à l'élévation du niveau de la mer au cours du XX^e siècle, et on s'attend à ce que l'incidence du changement climatique sur les calottes polaires prenne plusieurs siècles avant de se faire sentir. Le GIEC a comparé des estimations des contributions combinées de l'être humain à l'élévation du niveau de la mer avec les incidences combinées des causes naturelles de ce phénomène. Étant donné que ces causes naturelles combinées ne peuvent expliquer l'ampleur réelle de l'élévation du niveau de la mer, il convient de suggérer que le changement climatique qui a eu lieu au XX^e siècle a contribué à l'élévation du niveau de la mer de ce même siècle.

Projection des futurs changements climatiques

D'ici la fin du XXI^e siècle, si nous maintenons le statu quo, les concentrations de gaz à effet de serre pourraient grimper à des niveaux beaucoup plus élevés qu'actuellement. En fait, ces concentrations pourraient équivaloir à plusieurs fois les concentrations de dioxyde de carbone produites au début de l'ère industrielle. S'appuyant sur des observations, les modèles informatiques prévoient que cette augmentation provoquera sans doute de très importants changements climatiques. Le GIEC prévoit que la température mondiale moyenne augmentera de 1,4° à 5,8° Celsius entre 1990 et 2100. En comparaison, le taux de réchauffement au cours de la période de rétablissement suivant la dernière époque glaciaire se situait à environ 2° Celsius par millénaire.

Les climatologues s'entendent en général sur les changements climatiques pouvant survenir au cours de notre siècle si nous maintenons le statu quo. Parmi les principaux changements attendus, on trouve les suivants :

- le réchauffement sera plus intense à haute latitude qu'à basse latitude, et ce, en raison de la fonte saisonnière de glace et de neige;
- le réchauffement tendra à être plus intense pendant l'hiver que pendant l'été à proximité des océans à haute latitude en raison de l'amincissement de la glace marine;
- les chutes de pluie auront davantage tendance à s'intensifier (c'est-à-dire que la pluie tombera davantage sous forme de pluie diluvienne);
- le temps sera plus sec en été à l'intérieur de la plupart des continents à latitude moyenne, avec un risque accru de sécheresse.

Pour prévoir les futures tendances climatiques, les chercheurs doivent tout d'abord faire des prévisions pour chacun des facteurs clés qui auront une incidence sur le climat, dont l'importance des futures émissions de gaz à effet de serre, l'accumulation probable de ces gaz dans l'atmosphère et l'importance du réchauffement qui risque de survenir. Les chercheurs doivent également examiner et tenter de quantifier les interactions possibles entre les changements climatiques et l'accumulation de gaz à effet de serre.

L'ampleur des futures émissions de gaz à effet de serre sera imputable à de nombreux facteurs, dont la croissance de l'économie mondiale, les progrès technologiques et l'efficacité énergétique. Pour préparer son rapport de 2001, le GIEC a élaboré une série de scénarios sur les futures émissions de gaz à effet de serre. Chaque scénario était axé sur une série d'hypothèses interdépendantes touchant la croissance démographique, le bien-être social et économique, le commerce et les préoccupations générales concernant l'environnement. On a jugé que ces scénarios illustraient bien le statu quo puisqu'ils ne présupposaient pas que les sociétés prendraient délibérément des mesures en vue de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre (Figure 6).

L'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère est évidemment fonction de l'ampleur des futurs taux d'émission, mais aussi des trajets naturels que suit le dioxyde de carbone pour être absorbé par les forêts et les océans. Les chercheurs doivent estimer l'incidence probable de ces trajets d'absorption sur l'accumulation de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Le rapport de 2001 du GIEC note que l'absorption de dioxyde de carbone par les forêts peut très bien s'amenuiser au cours du présent siècle. En outre, les océans auront tendance à absorber le dioxyde de carbone à un rythme inférieur aux taux d'émission prévus. Les océans réchauffés ne pourront absorber autant de dioxyde de carbone, celui-ci étant moins soluble dans des eaux à des températures plus élevées. Ainsi, l'absorption terrestre et océanique réduite de dioxyde de carbone en accentuera l'accumulation dans l'atmosphère. Les chercheurs doivent également estimer la rapidité avec laquelle les autres gaz à effet de serre devraient s'accumuler dans l'atmosphère. Il est courant pour les climatologues de doubler les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone qu'ils utilisent comme jalon aux fins de comparaison. Lorsque l'effet calorifique de tous les gaz à effet de serre correspond au réchauffement qui se produirait si seules les concentrations de dioxyde de carbone doublaient, on obtient un *équivalent climatique* du doublement des concentrations de dioxyde de carbone.

L'un des principaux paramètres qui entrent dans les projections des futurs changements climatiques est la *sensibilité du climat*, qui est souvent décrite comme le réchauffement moyen de la planète une fois que le climat s'est entièrement ajusté à un doublement de dioxyde de carbone dans l'atmosphère (ou à son équivalent climatique). Plus la sensibilité du climat est grande, plus le réchauffement éventuel de la planète sera important et rapide. Il existe plusieurs méthodes indépendantes pour estimer la sensibilité du climat, et les chercheurs ont constaté que ces méthodes produisent des résultats en grande partie similaires. C'est pourquoi le GIEC, dans son rapport de 2001, n'a pas modifié son estimation de la sensibilité du climat (de 1,5° à 4,5° Celsius).

Pour prévoir les formes que prendra le changement climatique à l'échelon régional, les chercheurs créent des modèles informatiques tridimensionnels, décrits sous le nom de modèles de la circulation générale de l'atmosphère ou MCGA. Il existe de nombreux modèles complexes de ce genre. Ces modèles prévoient les mêmes changements climatiques d'envergure, comme le réchauffement plus intense à haute latitude, le réchauffement plus important pendant l'hiver que pendant l'été et les autres changements cités précédemment.

Au cours des dernières décennies, les modèles climatiques ont grandement progressé et peuvent très bien simuler les aspects généraux des changements climatiques observés, comme le réchauffement minime ou léger refroidissement observé dans le nord-ouest de l'océan Atlantique et dans certaines régions de l'Antarctique. Les climatologues soulignent que les modèles climatiques ne peuvent décrire avec certitude les changements particuliers pouvant survenir à un endroit donné. Certaines régions peuvent tirer profit du réchauffement initial de la planète, tandis que d'autres en souffriront. Puisque personne ne peut identifier en toute confiance qui sortira initialement gagnant ou perdant de ce réchauffement, les modélisateurs en climatologie soutiennent que toutes les régions devraient être considérées à risque.

La possibilité de faire face à des « surprises » climatiques, comme une abrupte réorganisation des courants océaniques lorsque certains seuils critiques sont franchis, est l'un des principaux problèmes liés à la projection des futurs changements climatiques. La probabilité de ces événements est très incertaine, mais s'il devait en survenir un, cela pourrait avoir des conséquences catastrophiques. Parmi les exemples de surprises climatiques, citons l'amenuisement ou même la disparition du Gulf Stream dans l'Atlantique Nord, qui amène la chaleur des tropiques jusqu'en Europe, ou encore un changement dans l'intensité et la fréquence d'El Niño, qui est une oscillation périodique de la température des eaux tropicales de l'océan Pacifique ayant des répercussions à l'échelle de la planète. Ce phénomène a une grande incidence sur le temps en Amérique du Nord, et est notamment relié aux cycles de sécheresse. De tels événements se sont produits dans le passé, mais il est difficile de prévoir s'ils peuvent se reproduire. Cependant, si des changements climatiques d'envergure surviennent, il est possible qu'ils déclenchent des variations abruptes qui ne peuvent être prédites avec précision.

Conclusion

Dans le présent rapport spécial et l'annexe technique qui l'accompagne, j'ai essayé de fournir une évaluation objective des données scientifiques et techniques disponibles sur le changement climatique. Compte tenu de toutes ces preuves, je peux conclure sans l'ombre d'un doute qu'un changement climatique anthropique a actuellement lieu. Celui-ci aura de graves conséquences sur l'environnement dans un proche avenir. Nous avons déjà commencé à noter les répercussions du changement climatique à l'échelle mondiale. Ces répercussions auront une incidence sur la population ontarienne et sur l'environnement où elle vit.

La science n'est pas une entité statique, mais un processus constant d'apprentissage. L'incertitude en science fait partie intégrante du processus scientifique et favorise la réalisation de recherches supplémentaires. Au cours de la dernière décennie, les scientifiques ont fourni des preuves plus précises selon lesquelles des changements climatiques ont lieu à l'échelle

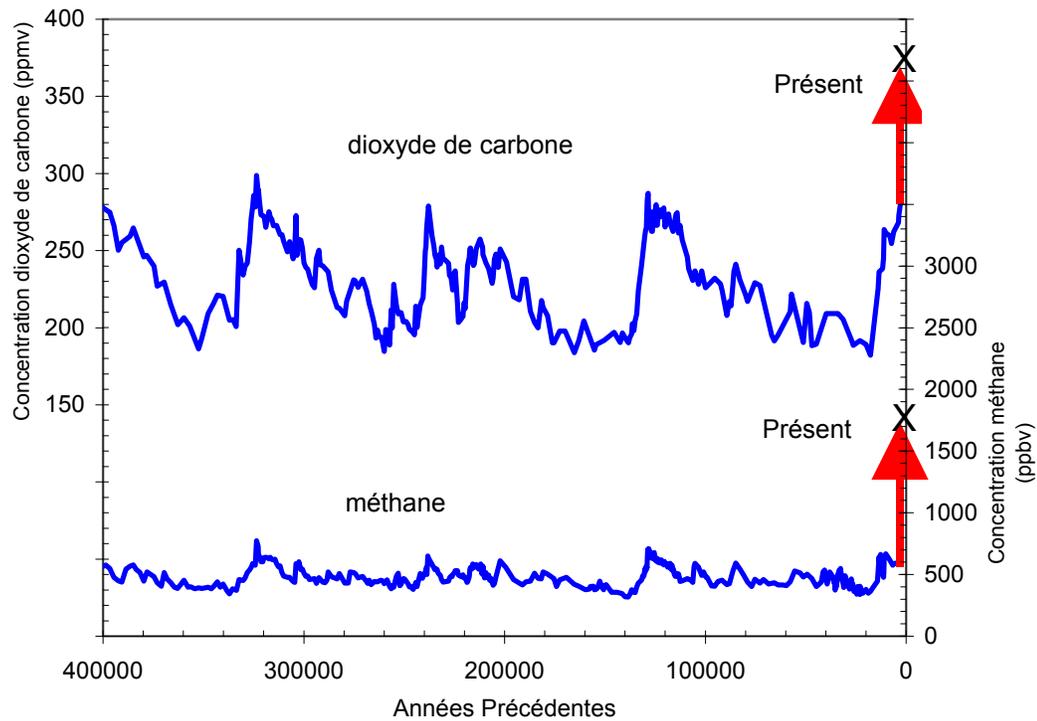
mondiale. Cette évolution des connaissances nous permettra de mieux comprendre le rôle de l'être humain dans ce changement climatique.

La province de l'Ontario a un rôle clé à jouer dans la prise de décisions à l'égard du changement climatique. De nombreux débats légitimes sont encore à faire, mais le temps presse. J'encourage les décideurs ontariens à examiner d'eux-mêmes les preuves concernant le changement climatique. S'ils concluent, tout comme moi, que ces preuves sont convaincantes, il sera alors évident que le statu quo n'est plus une option, et ils seront prêts à envisager la réponse de l'Ontario.

ANNEXE A:

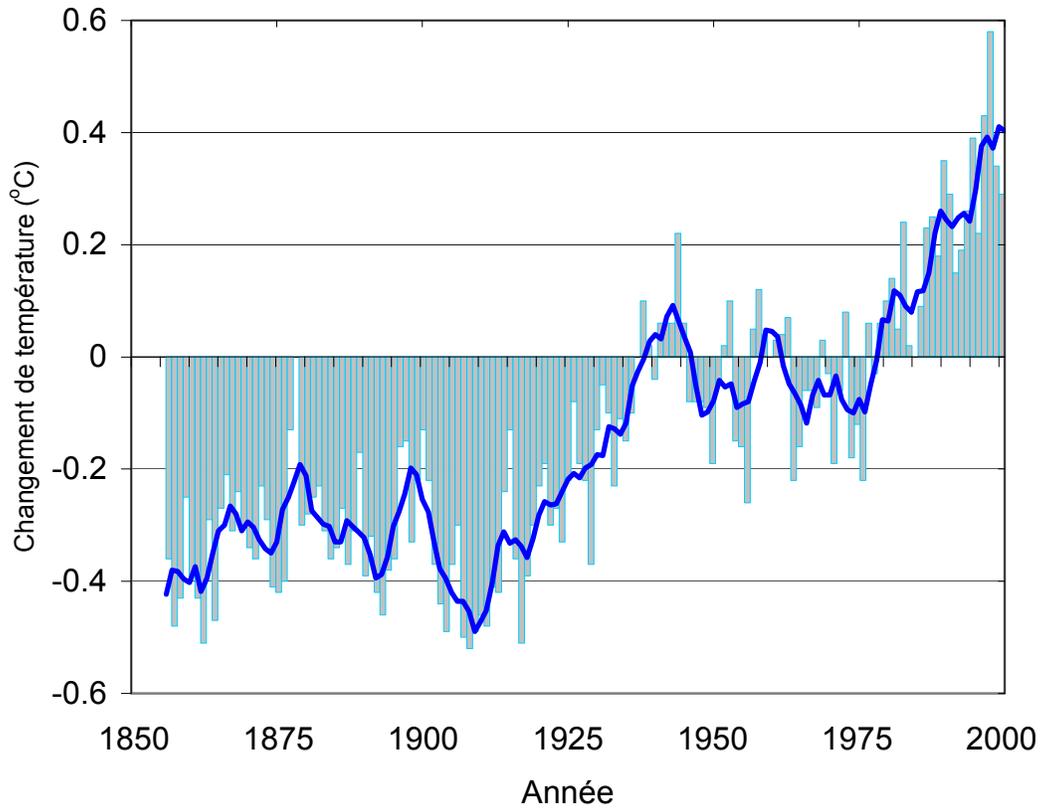
Figures

Figure 1. Variations de concentrations atmosphériques du dioxyde de carbone et méthane depuis 400,000 années jusqu'à présent



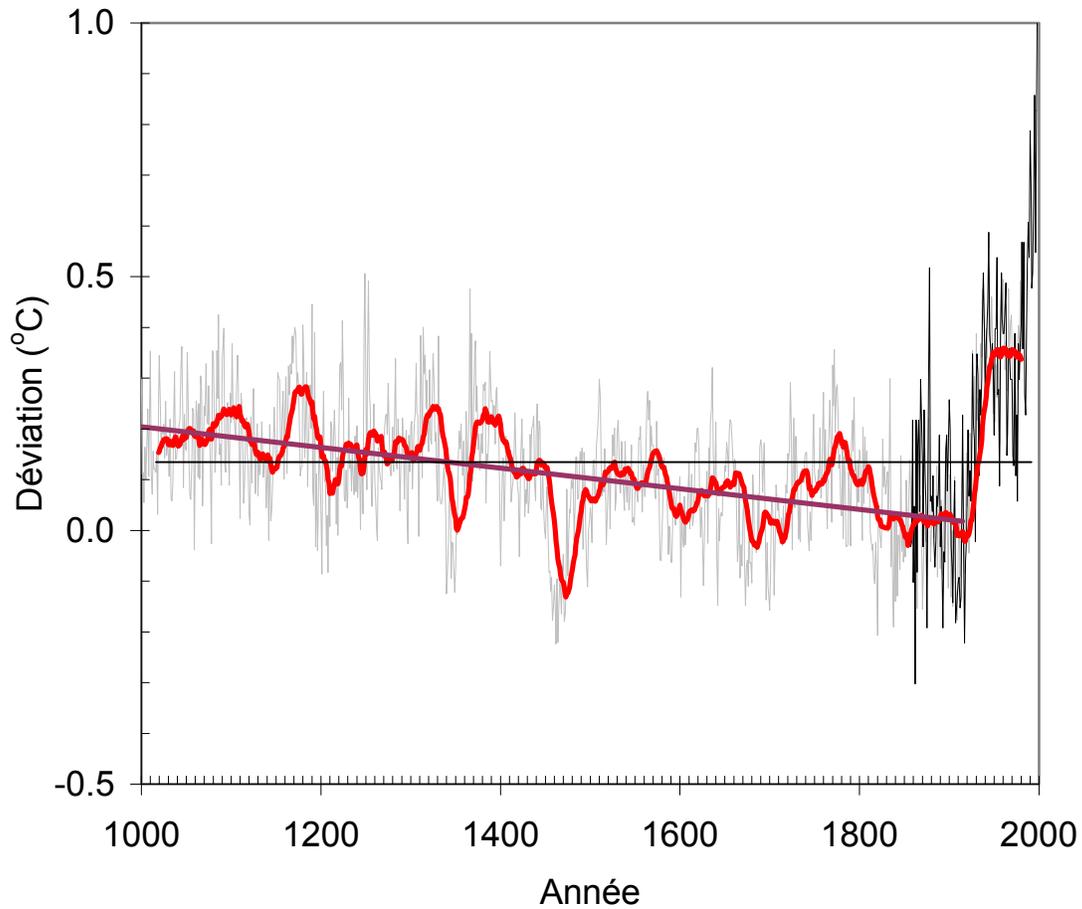
Variations des concentrations atmosphérique de dioxyde de carbone et de méthane pendant les dernières 400,000 années mesurés à partir de la carotte glacière provenant de Vostok en Antarctique (ligne mince) et pendant les dernières 200 années (ligne flèche). Source: Préparé par le professeur Danny Harvey, Département de Géographie, Université de Toronto, utilisant les données électroniques provenant du site Web du US National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA) (<http://www.ngdc.noaa.gov/paleo>).

Figure 2. Variations des moyennes de température de surface au niveau global durant la période 1856-2000



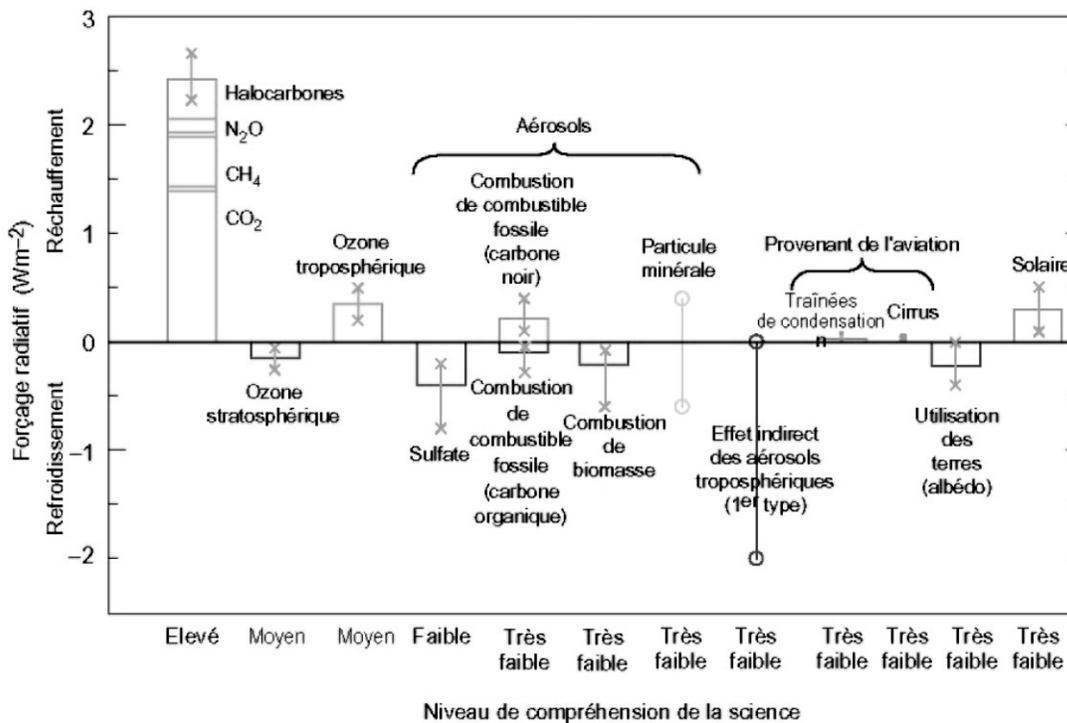
Variations des moyennes de température de surface au niveau global durant la période 1856-2000. Source: Préparé par le professeur Danny Harvey, Département de Géographie, Université de Toronto, utilisant les données électroniques provenant du site Web du UK Meteorological Office (<http://www.metogov.uk>).

Figure 3. Variations des moyennes de températures de surface de l'hémisphère Nord



Variations des moyennes de température de surface de l'hémisphère Nord basées principalement sur les données des carottes de glaces, anneaux d'arbres et récifs de corail, d'après la reconstruction de Mann et al. (1999) (ligne mince pale). Également représentées sont les données pour les moyennes paléo-climatiques annuelle par tranche de 20 ans durant la période 1000-1900 (lignes épaisses), et les observations directes des variations de températures de la Figure 2 (ligne mince foncé). Source: Préparé par le professeur Danny Harvey, Département de Géographie, Université de Toronto, utilisant les données historiques et paléo-climatiques des sites Web due NOAA et UK mentionnés dans la description des Figures 1 et 2 respectivement.

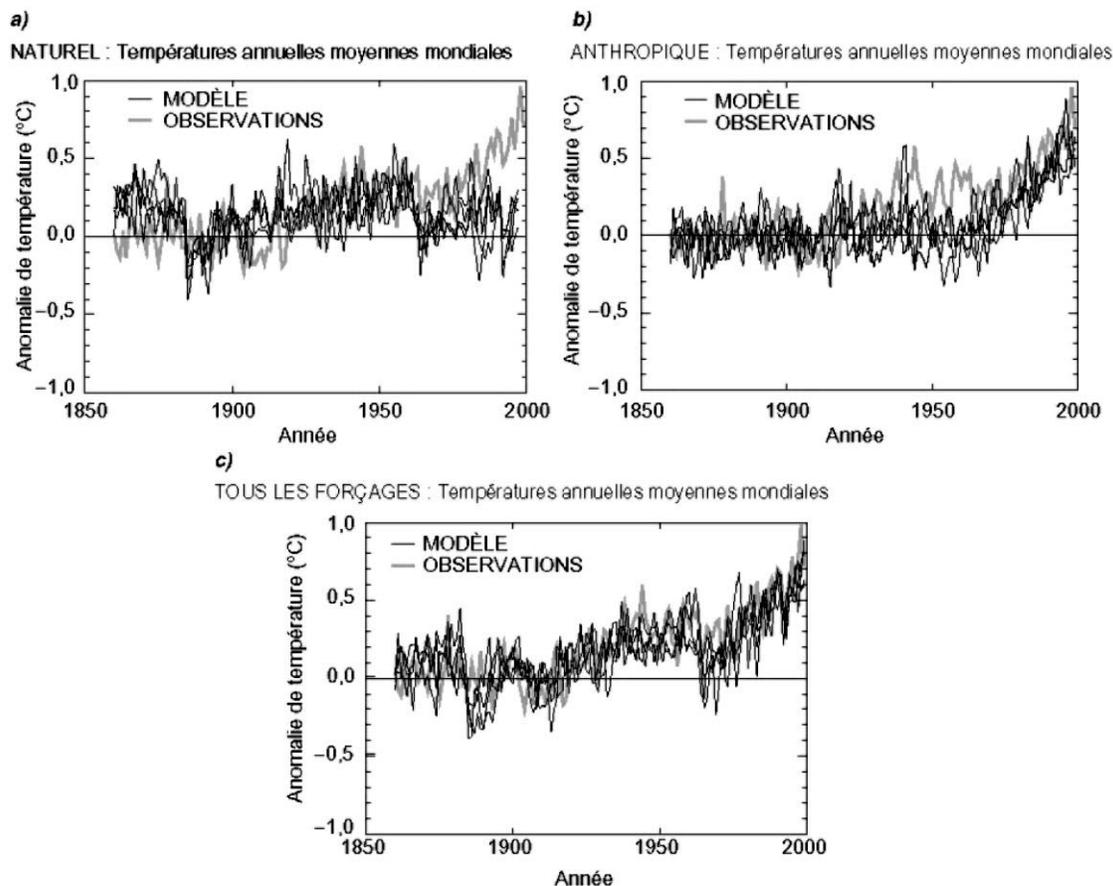
Figure 4. Forçage radiatif moyen global du système climatique en l'an 2000 par rapport à 1750



Ces forçages radiatifs résultent des changements dans la composition de l'atmosphère, de la modification de la réflectivité en surface par une nouvelle affectation des sols et de la variation du rayonnement solaire. L'activité humaine est liée à chacun de ces facteurs, à l'exception de la variation du rayonnement solaire. Les barres rectangulaires représentent les estimations des contributions de ces forçages - dont certains produisent un réchauffement et d'autres un refroidissement. Le forçage dû à des événements volcaniques épisodiques, qui provoquent un forçage négatif ne durant que quelques années, n'est pas indiqué. L'effet indirect des aérosols, tel qu'illustré dans cette figure, est leur effet sur la taille et le nombre des gouttelettes nuageuses. Un deuxième effet indirect des aérosols sur les nuages, à savoir leur effet sur la durée de vie des nuages, qui provoquerait lui aussi un forçage négatif, n'est pas indiqué. Les effets de l'aviation sur les gaz à effet de serre sont inclus dans chacune des barres. La ligne verticale de chaque côté des barres rectangulaires donne la gamme des estimations, basée sur la dispersion des valeurs publiées des forçages et sur les connaissances physiques du phénomène. Certains des forçages présentent un degré de certitude bien plus élevé que d'autres. Une ligne verticale sans barre rectangulaire est indicatrice d'un forçage pour lequel l'on n'a pas la possibilité de fournir la meilleure estimation en raison de l'existence d'importantes incertitudes. Comme nous l'avons déjà fait observer, le niveau général des connaissances scientifiques varie considérablement d'un forçage à l'autre. Certains agents du forçage radiatif, tels que le CO₂, sont bien mélangés à l'échelle mondiale, ce qui perturbe le bilan thermique global. D'autres, tels que les aérosols, ont une répartition spatiale telle qu'elle les conduit à perturber ce bilan avec des signatures régionales beaucoup plus marquées. Pour cette raison et pour d'autres encore, on ne saurait s'attendre à ce que la simple somme des barres positives et négatives indique l'effet net sur le système climatique. Les simulations de ce rapport d'évaluation (par exemple la Figure SPM 5) montrent que l'effet net estimé de ces perturbations est un réchauffement du climat global depuis 1750.

Source : Geic, 2001; Reproduit avec la permission du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

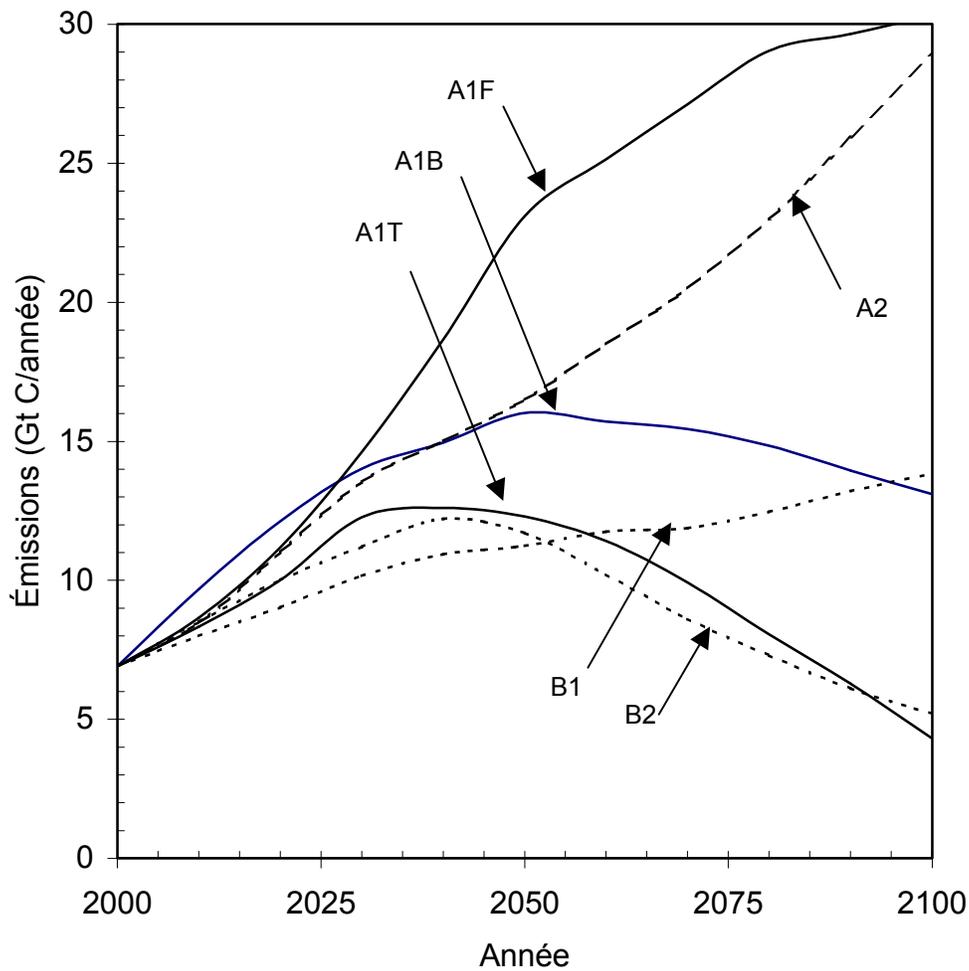
Figure 5. Simulation de la moyenne annuelle au niveau global de température de surface



Un modèle climatique peut être utilisé pour simuler les changements de température dus à la fois à des causes naturelles et à des causes anthropiques. Les simulations représentées par la bande large dans a) n'ont été effectuées qu'avec les forçages naturels: la variation du rayonnement solaire et de l'activité volcanique. Les simulations comprises dans la bande large de la Figure b) ont été effectuées avec les forçages anthropiques: les gaz à effet de serre et une estimation des aérosols sulfatés, et les estimations comprises dans la bande large de la Figure c) ont été effectuées à la fois avec les forçages naturels et avec les forçages anthropiques. La Figure b) montre que l'inclusion des forçages anthropiques offre une explication plausible pour une partie importante des changements de température observés au siècle dernier, mais la correspondance la plus étroite avec les observations est obtenue dans la Figure c), dans laquelle sont inclus à la fois les facteurs naturels et les facteurs anthropiques. Ces résultats montrent que les forçages inclus sont suffisants pour expliquer les changements observés, sans exclure pour autant la possibilité que d'autres forçages puissent eux aussi avoir contribué à ces changements. Les bandes larges des résultats du modèle présentées ici ont été obtenues en appliquant à quatre reprises le même modèle. Des résultats semblables à ceux de la Figure b) ont été obtenus avec d'autres modèles incluant le forçage anthropique.

Source : Geic, 2001; Reproduit avec la permission du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

Figure 6. Projections pour les émissions de dioxyde de carbone pour la période de 2000-2100



Le point mitoyen de la projection des émissions de CO₂ causés par l'utilisation des carburants fossiles pour le scénario des groupes du SRES A1T, A1B, A1T, A2, B1, et B2. Au sein de chaque groupe, il y a une vaste gamme de trajectoires d'émissions qui conséquemment peut causer une juxtaposition importante entre les groupes, comme discuté par Nakicenovic et al. (2000). Source: Préparé par le professeur Danny Harvey, Département de Géographie, Université de Toronto, en utilisant les données publiées par Houghton et al. (2001), Annexe II.I.

ANNEXE B :

ANNEXE TECHNIQUE
LES FONDEMENTS SCIENTIFIQUES DU
CHANGEMENT CLIMATIQUE SONT-ILS VALIDES?

Table des matières

SECTION 1 – Changements observés dans le climat et dans d’autres indicateurs.....	1
1.1 Augmentation des concentrations de gaz à effet de serre	1
1.2 Hausse des températures	2
1.3 Glaciers, calottes polaires et autres indicateurs.....	6
1.4 Élévation du niveau de la mer.....	7
1.5 Conclusion	7
SECTION 2 – Causes des changements observés dans le climat.....	8
2.1 Raisons de l’augmentation des concentrations de gaz à effet de serre	8
2.2 Le concept de forçage radiatif.....	10
2.3 Contributions de l’être humain au changement climatique.....	11
2.4 Débats concernant les facteurs naturels et anthropiques du changement climatique	12
2.5 Débats concernant les preuves	13
2.6 Causes de l’élévation récente du niveau de la mer.....	15
2.7 Conclusion	17
SECTION 3 – Projections des futurs changements climatiques.....	18
3.1 Modèles économiques s’appliquant aux scénarios sur les futures émissions.....	18
3.2 Utilisation de modèles du cycle du carbone pour calculer l’accumulation de dioxyde de carbone.....	19
3.3 Modèles climatiques servant à calculer le changement climatique survenu.....	20
3.4 Rétroactions du cycle climat-carbone	21
3.5 Tendances et caractéristiques régionales du changement climatique	21
3.6 Les modèles climatiques sont-ils fiables?.....	23
Bibliographie	26

ANNEXE TECHNIQUE

LES FONDEMENTS SCIENTIFIQUES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SONT-ILS VALIDES?

SECTION 1 – Changements observés dans le climat et dans d’autres indicateurs

La présente section examine les preuves du changement dans le climat et les systèmes climatiques de la Terre. Les tendances ayant trait aux concentrations de gaz à effet de serre dans l’atmosphère y sont décrites. Les changements observés dans les températures et dans d’autres indicateurs du changement climatique, comme les glaciers, les calottes polaires et le manteau nival, y sont également présentés. Enfin, une discussion sur les variations de l’élévation du niveau de la mer y figure.

Qu’est-ce que l’effet de serre?

L’effet de serre est une fonction naturelle de l’atmosphère terrestre qui permet de modérer la température de la planète. En termes simples, l’effet de serre s’entend de la rétention de la chaleur par l’atmosphère (voir la figure ci-après). L’effet de serre tire son nom du fait qu’il a un effet similaire à celui du verre dans une serre, c’est-à-dire qu’il permet à la radiation de pénétrer dans l’atmosphère, mais empêche le gros de la chaleur produite par cette radiation solaire de s’échapper. La radiation solaire atteint et réchauffe la surface de la Terre, puis est réfléchi vers l’espace sous forme de radiation infrarouge. Les gaz à effet de serre absorbent cette radiation et en redirigent une partie vers la Terre, réchauffant cette dernière. La vapeur d’eau, le dioxyde de carbone, le méthane, l’oxyde nitreux et l’ozone sont certains des principaux gaz à effet de serre. Sans ces gaz à effet de serre entourant la Terre, celle-ci serait environ 33 °C plus froide, et c’est pourquoi l’effet de serre naturel est essentiel à la vie sur Terre. Cependant, on craint que l’augmentation des concentrations de gaz à effet de serre attribuable à l’être humain accentue l’effet de serre naturel et provoque ainsi une augmentation des températures.

1.1 Augmentation des concentrations de gaz à effet de serre

L’augmentation observée des concentrations de gaz à effet de serre dans l’atmosphère fait l’objet d’un large consensus parmi les scientifiques et n’est pas vraiment contestée. Les chiffres suivants sont tirés en grande partie du troisième rapport d’évaluation du Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat (GIEC) sur le changement climatique (rapport de 2001 du GIEC) et ont été confirmés par le National Research Council (NRC) des États-Unis.

Les concentrations de dioxyde de carbone dans l’atmosphère sont plus élevées actuellement qu’à tout autre moment au cours des 420 000 dernières années au moins, comme l’illustre la Figure 1. Les concentrations de dioxyde de carbone ont varié entre 180 et 300 parties par million en volume (ppmv) au cours des ères glaciaires, mais sont demeurées à un niveau relativement stable de 270 à 290 ppmv entre la fin de la dernière ère glaciaire et le début de l’ère industrielle. Les concentrations de dioxyde de carbone dans l’atmosphère ont alors augmenté de 31 pour 100, tout d’abord graduellement puis à un rythme accéléré, celles-ci passant de 280 ppmv en 1800 à 370 ppmv en 2000.¹ Le taux d’augmentation des concentrations de dioxyde de carbone au cours du dernier siècle est au moins 10 fois plus élevé qu’à tout autre moment au cours des 20 000 dernières années.²

Les concentrations de méthane sont également plus élevées qu'elles ne l'ont jamais été au cours des 420 000 dernières années. Ainsi, ces concentrations ont plus que doublé depuis 1750, celles-ci passant d'environ 700 parties par milliard en volume (ppbv) à 1 745 ppbv en 1998.³ Les concentrations d'oxyde nitreux sont à leur niveau le plus élevé des mille dernières années au moins, celles-ci étant passées de 270 ppbv en 1750 à 314 ppbv en 1998, soit une augmentation d'environ 16 pour 100.⁴

On estime que les concentrations d'ozone troposphérique ont augmenté de 35 pour 100 depuis 1750.⁵ En outre, les concentrations d'ozone près de la surface pendant l'été sont de deux à cinq fois plus élevées au-dessus du gros de l'Amérique du Nord qu'elles ne l'étaient pendant l'ère industrielle.⁶ Les halocarbures, comme les chlorofluorocarbures et autres gaz anthropiques, ne sont présents dans l'atmosphère que depuis le XX^e siècle, époque à laquelle ils ont été créés. Les concentrations de la plupart des substances appauvrissant la couche d'ozone diminuent ou augmentent plus lentement, et ce, en raison des mesures prises au milieu des années 1990 dans le cadre du Protocole de Montréal. Les concentrations des autres gaz à effet de serre synthétiques continuent d'augmenter.⁷

Sur quoi sont fondées les conclusions du GIEC?

Pour déterminer les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère au fil du temps, les scientifiques ont mesuré les concentrations de ces gaz encore présentes dans des bulles d'air emprisonnées dans des carottes de glace extraites de plusieurs endroits en Antarctique et au Groenland. Les données de la Figure 1 proviennent de la carotte de glace de Vostok, qui a été extraite en Antarctique et qui indique les concentrations de dioxyde de carbone, de méthane et d'oxyde nitreux présentes dans l'atmosphère au cours des 420 000 dernières années, soit au cours des quatre dernières ères glaciaires.

Le dioxyde de carbone, le méthane, l'oxyde nitreux et les halocarbures sont aussi décrits comme des gaz à effet de serre « bien mélangés », parce qu'ils demeurent suffisamment longtemps dans l'atmosphère pour que leurs concentrations soient presque exactement les mêmes peu importe où l'on se trouve sur Terre. Par conséquent, une fois les concentrations de ces gaz mesurées à un endroit donné, il est possible de savoir quelles en sont les concentrations à l'échelle mondiale. Les légères variations enregistrées à l'échelon régional et hémisphérique permettent de mesurer la répartition régionale des sources et des processus d'élimination naturels de ces gaz à effet de serre. Les concentrations de dioxyde de carbone ont été mesurées continuellement par deux stations depuis 1958 et par l'intermédiaire d'un réseau mondial depuis les années 1970. Ces mesures continues et hautement précises corroborent les mesures tirées des carottes de glace pour les mêmes années. Cependant, l'ozone et les aérosols ne demeurent pas très longtemps dans l'atmosphère avant qu'ils ne soient éliminés, et leurs concentrations varient donc sensiblement d'un endroit à un autre. C'est pourquoi il est plus difficile d'en arriver à une concentration mondiale moyenne pour ces gaz.

1.2 Hausse des températures

Les scientifiques s'entendent en général pour dire que la température mondiale moyenne a augmenté au cours du dernier siècle, des preuves convaincantes venant appuyer cette assertion. Le rapport de 2001 du GIEC conclut avec un niveau de confiance de 95 pour 100 que la température mondiale moyenne à la surface de la Terre a augmenté de 0,6 °C au cours du XX^e siècle, à plus ou moins 0,2 °C près.⁸ Bien qu'une augmentation de 0,6 °C puisse sembler minime sur le plan météorologique local, il s'agit là d'une augmentation importante à l'échelle mondiale. Selon le même rapport, il est également fort probable que les années 1990 et l'année 1998 aient été respectivement la décennie et l'année la plus chaude jamais enregistrées depuis 1861⁹ (Figure 2).

D'autres organismes scientifiques ont examiné et corroboré les conclusions du rapport de 2001 du GIEC. Par exemple, on a demandé au NRC de remettre en juin 2001 un rapport à la Maison Blanche sur cette

question, et celui-ci a conclu que malgré certaines incertitudes, il était généralement reconnu que le réchauffement observé était réel et s'était particulièrement intensifié au cours des 20 dernières années.¹⁰

La hausse de la température mondiale est reconnue

Au sein de la communauté scientifique, tous sont virtuellement d'accord pour dire que la température mondiale moyenne augmente, même les scientifiques qui doutent autrement des répercussions annoncées du changement climatique. Par exemple, le D^r Richard Lindzen, membre de la National Academy of Sciences des États-Unis, est un éminent scientifique qui doute que l'être humain menace le climat. Cependant, il convient que la Terre s'est réchauffée d'environ 0,5 °C au cours des quelque 100 dernières années, et que les activités humaines ont accru les concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère d'environ 30 pour 100.¹¹ Pareillement, le D^r S. Fred Singer, un géophysicien fréquemment cité et qui met en question l'incidence de l'être humain sur le changement climatique, note néanmoins qu'il est en général convenu que le climat de la planète s'est réchauffé entre 1880 environ et 1940.¹² Le D^r Bjorn Lomborg, auteur du *Skeptical Environmentalist*, convient également que les températures ont augmenté et précise de plus que cette augmentation est due à l'être humain. Ainsi, il a déclaré avoir utilisé dans son livre les rapports du GIEC comme principaux documents de référence et a précisé que, nonobstant toutes les incertitudes soulevées, il acceptait la thèse voulant que le réchauffement de la planète soit de nature anthropique.¹³

Sur quoi sont fondées les conclusions du GIEC?

Températures au cours du dernier siècle

Pour déterminer les températures mondiales moyennes du dernier siècle qu'il cite dans son dernier rapport, le GIEC a examiné plusieurs importantes bases de données qui font autorité. Ces bases de données renferment les températures prises tous les jours dans des milliers de stations terrestres et à bord de milliers de vaisseaux depuis la fin du XIX^e siècle.¹⁴ Les bases de données du Climate Research Institute de l'University of East Anglia, de même que le Global Historical Climatology Network (GHCN) dont les données sont tenues à jour par le National Climate Data Centre en Caroline du Nord, aux États-Unis, en sont deux exemples. Le GHCN peut servir à illustrer la portée et la qualité des données utilisées, ainsi que les efforts de contrôle de la qualité déployés par les organismes responsables des bases de données.¹⁵ Le GHCN a été créé précisément pour étudier les changements climatiques à l'échelon mondial et régional. La version 2 du GHCN, rendue publique en mai 1997, comporte des données sur les températures mensuelles moyennes à la surface mesurées par 7 280 stations partout dans le monde. Comparativement à la version de 1992, la version 2 du GHCN comporte des données plus récentes et offre une couverture plus dense et améliorée des régions pour lesquelles les données sont rares. En outre, la version 2 présente les données numérisées des premières températures enregistrées par les stations des colonies européennes d'outre-mer, notamment par des centaines de stations africaines.¹⁶

Toutes les stations du GHCN ont accumulé des données pour au moins 10 ans. Environ 1 000 stations du GHCN ont enregistré des températures moyennes pendant un siècle ou plus, procurant ainsi une excellente couverture de l'Amérique du Nord, de l'Europe et de régions de l'Asie et de l'Australie. Ailleurs sur la planète, la couverture d'avant 1900 est inégale, mais devrait s'améliorer à mesure que davantage de données antérieures sont numérisées et versées dans la base de données. La base de données du GHCN renferme 4,7 millions de températures mensuelles moyennes, de 1701 jusqu'à nos jours. Ces températures ont été tirées de 300 millions de mesures individuelles de la température. La base de données du GHCN a été dépouillée pour en tirer et en éliminer les nombreuses erreurs éventuelles qu'elle pouvait contenir, comme la répétition des séries de données pour une même station, les stations situées au mauvais endroit et les erreurs de numérisation. Les données aberrantes ont été déterminées, évaluées et, au besoin, éliminées. Chaque série de données a également été éprouvée sur le plan

statistique et rajustée afin de tenir compte des discontinuités pouvant être causées par les changements survenus au fil du temps dans l'instrumentation, les abris ou l'emplacement des stations.¹⁷ En bref, les températures qu'utilisent les chercheurs couvrent une vaste période et ont été recueillies sur un vaste territoire géographique, et les bases de données font l'objet d'un contrôle exhaustif de la qualité.

Le rapport de 2001 du GIEC note que les températures mesurées à la surface de la mer proviennent de plus de 80 millions d'observations dont l'homogénéité a été vérifiée, et qui ont été rectifiées afin de tenir compte des changements de méthodologie, comme l'utilisation de seaux de bois et de toile avant 1942.¹⁸ Bien que les températures sur terre et en mer aient été recueillies indépendamment les unes des autres, ces deux séries de données ont affiché les mêmes tendances générales au cours du dernier siècle. En d'autres termes, elles se corroborent l'une l'autre. En effet, ces deux séries de données ont révélé qu'il y avait eu une augmentation des températures mondiales moyennes à compter de 1900 jusque dans les années 1940, suivie par une stabilisation ou même une diminution des températures jusqu'au milieu ou à la fin des années 1970, puis par une augmentation des températures au cours des vingt dernières années.^{19 20}

Certains opposants à la thèse du changement climatique soutiennent que les mesures prises au thermomètre peuvent faire l'objet de nombreuses erreurs, dont des problèmes d'étalonnage et la transcription, la numérisation et la transmission erronées des données, et peuvent être influencées par de nombreux facteurs, comme le vent et la conception des stations météorologiques.²¹ Cependant, un comité du NRC a en grande partie rejeté ces arguments en 2000, car, selon lui, si ces problèmes de contrôle de la qualité corrompent partiellement les données, il est peu probable qu'ils faussent les résultats en raison du grand nombre de sites et de leur variété.²²

Certains prétendent également que les bases de données des températures mondiales visent davantage les nations industrialisées et les secteurs urbains que les régions peu peuplées.²³ En outre, les secteurs urbains sont affectés par la chaleur que dégagent les édifices et les véhicules, phénomène connu sous le nom d'effet de l'îlot de chaleur. Les critiques craignent que cet effet ne vienne fausser les résultats, le réchauffement mesuré étant par conséquent selon eux plus prononcé que le réchauffement réel. Cependant, les rapports du GIEC ont constamment contredit cet argument depuis 1992.²⁴ Le GIEC note que les chercheurs ont évalué les différentes bases de données des températures prises à la surface de la Terre et ont comparé les tendances à long terme des stations rurales avec celles de toutes les stations (stations rurales et stations urbaines). Ils ont constaté que les différences enregistrées n'étaient pas importantes du point de vue statistique, et en sont arrivés à la conclusion que l'effet d'îlot de chaleur sur les températures n'avait pas dans l'ensemble dépassé 0,05 °C environ entre 1900 et 1990.²⁵

Températures observées au cours des mille dernières années

Pour estimer les températures mondiales d'avant l'invention du thermomètre, les chercheurs ont employé un certain nombre d'indicateurs substitutifs. Par exemple, le D^r Michael Mann, auteur d'un ouvrage pour le compte du GIEC, et ses associés ont reconstitué les tendances mondiales des températures annuelles à la surface de la Terre à partir de l'an 1000 au moyen d'anneaux d'arbres, de carottes de glace tirées des régions polaires, d'indicateurs documentaires historiques et de données sur les coraux marins.²⁶ Ces indicateurs substitutifs proviennent non seulement de l'Amérique du Nord, mais aussi de l'Europe et de l'Asie, avec certains échantillons provenant de l'hémisphère Sud.²⁷ Vu que les données tirées d'anneaux d'arbres, de carottes de glace polaire et de coraux des eaux peu profondes des tropiques sont recueillies dans des régions très différentes du point de vue géographique, les chercheurs peuvent combiner ces indicateurs pour reconstituer sur une vaste échelle les tendances climatiques du passé.²⁸ Pour y arriver, les chercheurs déterminent les liens qui existent entre les indicateurs substitutifs et les températures en examinant les données tirées d'une partie de la période pendant laquelle ces indicateurs et ces températures se chevauchent (un processus connu sous le nom d'*étalonnage*), puis *vérifient* les liens qui existent en utilisant les prévisions climatiques et d'autres données qui n'ont pas servi à l'étalonnage, et

enfin *reconstituent* les variations de température pour la période pour laquelle aucune observation directe n'existe.²⁹

Débat suscité par certaines observations :

Données recueillies par satellite

Selon la plupart des modèles climatiques, à mesure que les concentrations de dioxyde de carbone augmentent, on s'attend à ce que la haute atmosphère (la stratosphère) se refroidisse, et à ce que les températures à la surface et dans la basse atmosphère (la troposphère) augmentent.³⁰ Selon les données recueillies par satellite, il y a eu, comme prévu, une tendance au refroidissement dans la stratosphère depuis 1979, année à laquelle ces données ont été recueillies pour la première fois. Cependant, ces données ont également révélé que, contrairement aux modèles établis, les températures dans la basse troposphère avaient augmenté de manière nettement moins marquée que les températures à la surface.³¹ C'est pourquoi certains croient que les températures enregistrées à la surface puissent ne pas être fiables, tandis que d'autres estiment que les données recueillies par satellite pourraient être erronées.

Le comité chargé des recherches sur le climat (Climate Research Committee) du NRC a mis sur pied un groupe pour étudier ces questions. Ce groupe a révélé en 2000 qu'il ne faisait nul doute que l'augmentation des températures mondiales moyennes à la surface survenue au cours des 20 dernières années avait été réelle et qu'elle avait été sensiblement plus marquée que le taux moyen de réchauffement enregistré au cours du XX^e siècle. La disparité entre les tendances à la surface et dans la haute atmosphère n'invalide en rien la conclusion voulant qu'il y ait augmentation des températures à la surface.³² Le groupe a également noté que les températures à la surface avaient le plus d'incidence directe sur la société et la vie humaine.³³ Plusieurs facteurs peuvent expliquer l'augmentation moins rapide des températures dans la troposphère par rapport aux températures à la surface, dont les éruptions volcaniques qui ont eu lieu entre 1979 et la fin des années 1990, de même que l'appauvrissement anthropique de la couche d'ozone dans la stratosphère.³⁴ Le rapport que le NRC a remis en 2001 à la Maison Blanche a convenu que l'appauvrissement de l'ozone dans la stratosphère pouvait être une cause de ce phénomène.³⁵

L'importance des aérosols sulfatés

Les aérosols sont des particules liquides ou solides en suspension dans l'air. Il existe de nombreux types d'aérosols, autant de sources humaines que naturelles. Les climatologues sont particulièrement intéressés par les aérosols sulfatés, parce que ces derniers proviennent des émissions de soufre dégagées par la combustion de carburants fossiles à teneur en soufre et par la fonte de métaux, et parce qu'ils ont pour effet de refroidir les températures dans l'atmosphère. Cependant, parce que leur temps de rétention dans l'atmosphère est en moyenne de seulement quatre à sept jours environ, leur effet de refroidissement est de courte durée. On peut s'attendre à ce que les émissions de soufre issues de la combustion de carburants fossiles diminuent au cours du XXI^e siècle, et ce, à mesure qu'un plus grand nombre de nations mettront en place des mesures de lutte contre la pollution de l'air. À mesure que les émissions de soufre diminueront, l'effet de refroidissement des aérosols sulfatés diminuera également, et on peut s'attendre à ce que le climat tende temporairement à se réchauffer plus rapidement en réaction à l'effet de réchauffement des gaz à effet de serre déjà présents dans l'atmosphère.³⁶

Variabilité du climat au cours des mille dernières années

La Figure 3 révèle qu'il y a eu, entre 1000 et 1900, une tendance à long terme au refroidissement abruptement renversée par le réchauffement des 100 dernières années, lequel s'avère donc un événement fortement inhabituel. D'autres anomalies climatiques ont eu lieu au cours des mille dernières années en Europe et dans les régions avoisinantes.³⁷ Parmi les épisodes les plus importants, on trouve une période de réchauffement médiéval, qui a duré du XI^e au XIV^e siècle environ, et aussi une période portant le nom de Petit âge glaciaire, qui s'est étendue du XVII^e siècle à la fin du XIX^e siècle environ. Certains

soutiennent que le réchauffement actuel fait peut-être simplement partie de cette variabilité naturelle ou que le climat ne fait peut-être que retourner à la « normale » après le Petit âge glaciaire.³⁸ Cependant, le plus récent rapport du GIEC a conclu que ces deux événements ne semblaient pas être survenus partout sur Terre. Des périodes de pointe de réchauffement et de refroidissement ont été observées au cours d'époques sensiblement différentes et dans des régions distinctes, et peuvent avoir été reliées aux variations régionales dans le climat nord-atlantique. En comparaison, le réchauffement observé au cours du XX^e siècle affiche une tendance mondiale plus prononcée.³⁹ (De plus, la hausse rapide des températures survenue à la fin du XX^e siècle n'est pas conforme à un retour graduel à des conditions normales et est de loin supérieure au refroidissement attribuable au Petit âge glaciaire.)

1.3 Glaciers, calottes polaires et autres indicateurs

Les scientifiques ont observé que les glaciers et les calottes polaires étaient particulièrement affectés par le changement climatique.⁴⁰ La fonte des glaciers et des calottes polaires contribue à l'élévation du niveau de la mer, mais a aussi une grande incidence sur le plan écologique, puisque les glaciers influent sensiblement sur les écosystèmes alpins et alimentent d'innombrables rivières et ruisseaux sur plusieurs continents.

Les glaciers et les calottes polaires acquièrent de la masse en accumulant de la neige qui se transforme en glace. L'ablation s'entend de la perte de masse due à la fonte de la glace et à son évaporation ou son écoulement subséquent sous forme d'eau. Une accumulation nette se produit à haute altitude et une ablation nette survient à faible altitude. L'examen du bilan massique permet essentiellement de mesurer l'évolution du glacier. Par exemple, le bilan massique est neutre si l'état du glacier ne change pas. Bien qu'il ne soit pas possible de mesurer le bilan massique des 10 000 glaciers de la planète, il est possible d'utiliser une méthode approximative pour mesurer le bilan massique des glaciers situés dans des régions climatiques similaires.⁴¹ Les scientifiques ont calculé la superficie et le volume des glaciers à l'échelon régional, travail facilité par la télédétection à haute résolution et par l'échosondage radio.⁴² Le bilan massique des glaciers varie sur le plan géographique et temporel. S'appuyant sur une synthèse des données disponibles, le GIEC a indiqué que les glaciers dans la plupart des régions du monde avaient affiché un bilan massique négatif au cours des 20 dernières années.⁴³

La possibilité de mesurer la taille des glaciers, plus particulièrement leur longueur, permet de recueillir une autre forme de renseignements climatiques. Le GIEC a conclu qu'il était maintenant clair que la plupart des glaciers de montagne avaient sensiblement reculé au cours des 100 dernières années.⁴⁴ Certains chercheurs appuient leur opposition au changement climatique sur l'avance (c'est-à-dire, l'augmentation de longueur) des glaciers à certains endroits. Le GIEC a expliqué que les glaciers avançaient en Norvège et en Nouvelle-Zélande en raison d'une augmentation inhabituelle des précipitations.⁴⁵

Il existe de nombreux autres indicateurs du réchauffement du climat, outre le recul des glaciers de montagne à l'échelle mondiale. Le manteau nival annuel dans l'hémisphère Nord a diminué d'environ 10 pour 100 depuis 1996.⁴⁶ Des études réalisées dans tout l'hémisphère Nord ont également révélé une réduction générale du manteau nival printanier au cours de la dernière moitié du XX^e siècle.⁴⁷ De plus, une analyse du gel des lacs et des rivières pour les 150 dernières années a révélé que les glaces se démantèlent plus rapidement au printemps et se forment plus tardivement à l'automne.⁴⁸ Des études réalisées à partir des données recueillies par satellite ont révélé que le changement climatique avait une incidence variable sur le comportement de la glace marine. Au cours des 30 dernières années environ, la portée de la glace marine arctique a diminué à un taux d'environ 3 pour 100 par décennie, tandis que son épaisseur minimale estivale a diminué de près de 40 pour 100.⁴⁹ Le pergélisol s'est généralement réchauffé dans de nombreuses régions. Par exemple, en Alaska, le pergélisol profond s'est réchauffé de 2 à 4 °C au cours du dernier siècle.⁵⁰ Les observations par satellite ont révélé que la saison de croissance au nord du 45^e parallèle Nord s'était rallongée de 12 jours (\pm 4 jours) entre 1981 et 1991.⁵¹ Enfin, un

certain nombre d'espèces animales et végétales se sont déplacées vers le nord ou se sont établies à des altitudes plus élevées au cours des dernières années.⁵²

1.4 Élévation du niveau de la mer

Le GIEC estime que l'élévation du niveau moyen de la mer au cours des cent dernières années a atteint de 0,1 à 0,2 mètre.⁵³ Les scientifiques calculent le niveau moyen de la mer d'une côte sur une période donnée pour en déterminer la variation au cours de cette période. Les marégraphes mesurent le niveau de la mer par rapport à la terre où l'appareil se trouve. Les variations dans le niveau moyen de la mer peuvent être causées par le mouvement de la terre, comme le relèvement ayant suivi l'ère glaciaire, ou par un changement dans la hauteur de la surface de la mer. Le mouvement de la terre est un facteur important, car les variations antérieures des charges de glace et d'eau ont entraîné une élévation du niveau de la mer dans les localités éloignées des anciennes marges glaciaires depuis la dernière ère glaciaire. Pour déterminer les variations dans le niveau moyen de la mer, les chercheurs doivent soustraire le mouvement de la terre des données produites par les marégraphes et des données géologiques de l'ancien niveau de la mer.

Selon l'analyse des données géologiques, le volume des océans peut avoir ajouté de 2,5 à 3,5 mètres au niveau moyen de la mer à l'échelon mondial au cours des 6 000 dernières années.⁵⁴ Cependant, les enregistrements à haute résolution du niveau de la mer révèlent que le gros de cette augmentation a eu lieu il y a plus de 3 000 ans.⁵⁵

Le taux moyen d'élévation du niveau de la mer, qui était de 0,1 à 0,2 millimètre par année au cours des 3 000 dernières années, a atteint de 1 à 2 millimètres par année au cours du XX^e siècle.⁵⁶ Il s'agit là d'une augmentation représentant un facteur de dix, bien que rien n'indique que ce phénomène se soit accéléré au cours du XX^e siècle vu l'impossibilité de détecter de tels changements avec assurance.⁵⁷

L'utilisation récente de l'altimétrie radar par satellite permet maintenant de recueillir des données sur presque tous les océans de la planète, et couvre presque tous les océans libres du 66^e parallèle Nord au 66^e parallèle Sud. Ces données peuvent servir à compléter les données sur les marées et peuvent être comparées à celles-ci. L'analyse des données recueillies par satellite depuis 1992, et rectifiées pour tenir compte de la dérive instrumentale et des comparaisons avec les marégraphes, a révélé que l'élévation du niveau de la mer avait atteint de 1,4 millimètre ($\pm 0,2$ millimètre) à 3,1 millimètres ($\pm 1,3$ millimètre) par année.⁵⁸ Les données recueillies présentaient des variations attribuables à El Niño, mais celles-ci suggéraient que le taux d'élévation du niveau de la mer au cours des années 1990 avait été plus rapide que celui enregistré pour le gros du XX^e siècle. Le GIEC indique ne pas savoir clairement si ce résultat est dû à une accélération récente du phénomène, à des différences dans les deux méthodes d'évaluation ou à la durée relativement courte de la période pendant laquelle des données ont été recueillies par satellite.⁵⁹

Malgré les anomalies soulevées par certains chercheurs, comme les diminutions du niveau de la mer à certains endroits, l'élévation accrue du niveau de la mer à l'échelle de la planète par rapport aux siècles précédents a été documentée dans des études réalisées partout dans le monde.⁶⁰

1.5 Conclusion

Les analyses des carottes de glace révèlent que les concentrations de dioxyde de carbone et de méthane sont plus élevées maintenant qu'elles ne l'ont jamais été au cours des 420 000 dernières années, et qu'elles augmentent à un taux sans cesse croissant depuis la révolution industrielle. Nombre des changements observés dans le climat et d'autres indicateurs sont liés les uns aux autres et corroborent la théorie du changement climatique. Par exemple, les températures enregistrées à la surface de la Terre et de la mer ont augmenté de manière uniforme. Le recul généralisé des glaciers de montagne correspond

aux augmentations des températures à l'échelle mondiale. Les réductions dans le manteau nival printanier depuis les années 1960 et dans le gel des lacs et des rivières au cours du dernier siècle sont reliées aux augmentations des températures dans l'hémisphère Nord. Les réductions dans la portée de la glace marine arctique au printemps et en été et dans l'épaisseur de la glace marine correspondent aux augmentations régionales des températures de la terre et des océans. Le GIEC conclut, dans son rapport de 2001, que ces tendances sont uniformément et manifestement attribuables à l'augmentation des températures de surface à l'échelle de la planète qui a eu lieu au cours du dernier siècle.⁶¹

SECTION 2 – Causes des changements observés dans le climat

La section précédente a décrit les changements observés dans le climat, dont les concentrations accrues de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, la hausse des températures moyennes à l'échelle de la planète et l'élévation du niveau de la mer. La présente section explique l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre et examine la question de savoir si ces concentrations accrues peuvent avoir causé l'augmentation des températures à l'échelle mondiale. Les principaux facteurs naturels et anthropiques du changement climatique sont expliqués dans la présente section, et on y fait mention de certains débats suscités par ces facteurs. Les causes de l'élévation du niveau de la mer y sont également discutées.

2.1 Raisons de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre

Les sources des émissions de dioxyde de carbone, de méthane et d'oxyde nitreux sont à la fois anthropiques (produites par l'homme) et naturelles. Selon les données tirées des carottes de glace polaire, les concentrations de dioxyde de carbone, de méthane et d'oxyde nitreux ont été relativement stables pendant plusieurs milliers d'années jusqu'aux deux derniers siècles. Les plus récentes augmentations de ces concentrations (celles de dioxyde de carbone et de méthane sont présentées à la Figure 1) sont sans nul doute attribuables à l'être humain. Bien que les émissions anthropiques de dioxyde de carbone soient minimales comparativement aux émissions naturelles de ce gaz, l'être humain a perturbé ce qui était presque un cycle parfaitement équilibré (où d'importantes émissions naturelles étaient compensées par d'importantes absorptions naturelles). Le GIEC estime que de 70 à 90 pour 100 de l'augmentation des émissions de dioxyde de carbone était attribuable à la combustion de carburants fossiles, le reste étant dû aux variations dans l'utilisation du sol, en particulier la déforestation.⁶² Le NRC convient également que les activités humaines sont responsables de l'augmentation des concentrations de dioxyde de carbone.⁶³

Les preuves à cet égard sont convaincantes. Premièrement, l'augmentation récente des concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère dépasse les limites de la variabilité naturelle des 420 000 dernières années. Deuxièmement, le taux d'augmentation des concentrations au cours du siècle dernier correspond aux émissions produites par l'être humain. Troisièmement, l'oxygène atmosphérique a diminué au même rythme que sont survenues les émissions de dioxyde de carbone, et ce, parce que la combustion de carburants fossiles brûle de l'oxygène.⁶⁴ La diminution observée des isotopes du carbone 13 et du carbone 14 dans l'atmosphère est une autre empreinte sans équivoque que laisse la combustion de carburants fossiles.⁶⁵ Le carbone des carburants fossiles renferme relativement moins de carbone 13 que l'atmosphère et ne contient aucun carbone 14, ce dernier se désintégrant pendant que le carburant fossile se trouve sous terre. Lorsque les carburants fossiles sont brûlés, ils diluent le carbone 13 et le carbone 14 présents dans l'air, ce taux de dilution pouvant être mesuré. Les concentrations de dioxyde de carbone sont légèrement plus élevées dans l'hémisphère Nord que dans l'hémisphère Sud, et cette différence s'est accrue en même temps que les émissions de carburants fossiles ont augmenté, ces dernières étant concentrées dans l'hémisphère Nord.⁶⁶

La nature des gaz à effet de serre

La vapeur d'eau est le gaz à effet de serre que l'on trouve en plus grande quantité dans l'atmosphère, bien que dans le présent rapport, tout comme dans les rapports du GIEC, il ne fait pas l'objet des discussions sur les gaz à effet de serre parce que son abondance dans l'atmosphère n'est seulement que très indirectement affectée par l'être humain. On le considère plutôt comme faisant partie du cycle hydrologique naturel. Les *gaz à effet de serre bien mélangés* sont ceux qui demeurent dans l'atmosphère pendant au moins une année et qui tendent à être bien mélangés par les vents avant d'être éliminés. Les concentrations de ces gaz sont généralement homogènes peu importe où ils se trouvent dans l'atmosphère, et il est donc facile de mesurer celles-ci. Parmi les gaz à effet de serre bien mélangés, on trouve le dioxyde de carbone, le méthane, l'oxyde nitreux et les halocarbures. L'ozone est un *gaz à effet de serre non homogène* en raison de sa courte durée de vie. Il ne se répand pas très loin dans l'atmosphère avant qu'il ne soit éliminé, et c'est pourquoi les concentrations d'ozone varient à l'échelon régional. L'ozone n'est pas directement émis dans l'atmosphère comme la plupart des autres gaz à effet de serre, mais est formé par le mélange de la lumière solaire et de certains gaz. Parmi ces précurseurs ou gaz ozonogènes, on trouve les oxydes d'azote, les composés organiques volatils, les hydrocarbures, le méthane et le monoxyde de carbone.

Le potentiel de réchauffement de la planète (PRP) s'entend de la capacité d'un gaz à effet de serre à contribuer à l'effet de serre. On a arbitrairement attribué au dioxyde de carbone un PRP de 1, valeur qui représente l'unité de base aux fins de comparaison avec d'autres gaz – c'est-à-dire que le PRP de tous les autres gaz est exprimé en fonction de cette unité de base. Le PRP est mesuré sur un certain temps, puisque les gaz à effet de serre demeurent dans l'atmosphère pour différentes périodes. Pour la plupart de leurs travaux, les analystes de politique utilisent une période de 100 ans. Le PRP des plus importants gaz à effet de serre sur une échelle de 100 ans sont les suivants⁶⁷ :

• Dioxyde de carbone	1
• Méthane :	23
• Oxyde nitreux :	296
• Chlorofluorocarbure 11 :	4 600
• Chlorofluorocarbure 12 :	10 600

Nombre des gaz à effet de serre ont une capacité de rétention de la chaleur de plusieurs centaines à plusieurs milliers de fois supérieure à celle du dioxyde de carbone, et certains des gaz à effet de serre anthropiques demeureront dans l'atmosphère pendant des milliers d'années. C'est cependant le dioxyde de carbone qui a le plus d'incidence sur le climat parce qu'il est émis en de si grandes quantités.

On estime que plus de la moitié des émissions de méthane actuelles sont attribuables à des activités humaines, comme la manutention du gaz naturel, l'élevage de bétail, la culture du riz et l'exploitation de décharges. Environ le tiers des émissions d'oxyde nitreux provient des sols agricoles, des parcs d'engraissement du bétail et des entreprises de produits chimiques. Les concentrations d'ozone troposphérique ont augmenté en raison des émissions accrues de monoxyde de carbone, d'oxydes d'azote et de composés organiques volatils produites par les véhicules automobiles, par la combustion de carburants fossiles par les centrales électriques, et par la combustion de biomasse. Les halocarbures et d'autres composés synthétiques sont entièrement de nature anthropique et entrent dans la fabrication de réfrigérants, de propulseurs pour aérosols, de solvants, de mousses industrielles et de plastique.⁶⁸

Les estimations des émissions découlant de la combustion de carburants fossiles sont tirées de statistiques annuelles sur l'énergie compilées par les Nations Unies et la British Petroleum.⁶⁹ Les données utilisées pour estimer les émissions de dioxyde de carbone découlant des variations dans

l'utilisation du sol sont de nature davantage variable et sont moins précises. Les estimations des émissions de gaz synthétiques sont fiables, étant donné que leur production et leur utilisation sont bien documentées. Les estimations des émissions de méthane et d'oxyde nitreux sont moins certaines parce que les sources naturelles et anthropiques de ces deux gaz sont difficiles à mesurer.⁷⁰

L'incidence du dioxyde de carbone anthropique sur la pollution de l'air

Le dioxyde de carbone est le gaz à effet de serre que l'être humain produit en plus grande quantité. La majorité des émissions découlant des activités humaines est attribuable à la combustion de carburants fossiles, comme l'essence alimentant les véhicules automobiles ou le charbon qu'utilisent les industries. Le dioxyde de carbone lui-même n'est pas la cause directe des problèmes de pollution de l'air, comme l'accumulation d'ozone troposphérique ou les pluies acides. Cependant, certaines des principales sources de contamination qui mènent à la formation d'ozone (p. ex., les oxydes d'azote et les composés organiques volatils) et de pluies acides (oxydes d'azote et dioxyde de soufre) sont également liées à la combustion de carburants fossiles par les véhicules automobiles, les centrales électriques et les industries. Par conséquent, certaines des principales sources de dioxyde de carbone produisent également des émissions liées à certains problèmes de qualité de l'air, comme le smog ou les pluies acides. Presque toutes les mesures prises pour diminuer les émissions de dioxyde de carbone réduiront la pollution de l'air et atténueront les répercussions de celle-ci sur la santé. En outre, comme l'ozone est un gaz à effet de serre et la principale composante du smog, et que les particules fuligineuses ont un effet de réchauffement, tout effort déployé pour réduire le smog et la pollution particulaire aura une incidence positive sur le réchauffement de la planète.

2.2 Le concept de forçage radiatif

Plusieurs facteurs externes, tant naturels qu'anthropiques, peuvent avoir une incidence sur le changement climatique. Le terme « forçage radiatif » sert à décrire tout facteur qui altère l'équilibre qui existe entre l'énergie sortante et l'énergie entrante dans le système atmosphérique-terrestre. Un forçage radiatif positif entraîne un réchauffement, tandis qu'un forçage radiatif négatif produit un refroidissement. Les forçages radiatifs sont mesurés en watts par mètre carré. (W/m^2). Le GIEC décrit le forçage radiatif comme un concept qui peut servir à estimer l'incidence relative de différents facteurs naturels et anthropiques sur le climat.

La Figure 4 résume les estimations qu'a faites le GIEC des forçages radiatifs présents entre 1750 et 2000 et attribuables aux concentrations accrues de gaz à effet de serre et d'aérosols, au forçage solaire et à d'autres facteurs, et précise le niveau de compréhension scientifique pour chacun de ces forçages radiatifs. Cette figure illustre les conclusions du GIEC selon lesquelles les gaz à effet de serre, et le dioxyde de carbone en particulier, sont les forçages radiatifs positifs qui ont eu le plus d'impact.⁷¹ (Bien qu'il soit reconnu que la vapeur d'eau est le gaz à effet de serre que l'on trouve en plus grande quantité, on n'en mesure pas le forçage radiatif. Les variations dans les concentrations de vapeur d'eau sont considérées comme une fonction naturelle du système climatique, et on en discute de façon plus approfondie dans la section 3.3.)

Le GIEC estime que le forçage radiatif attribuable à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre bien mélangés depuis 1750 est de $+2,43 W/m^2$, avec un niveau d'incertitude de 10 pour 100.⁷² Le forçage attribué au dioxyde de carbone est de $+1,46 W/m^2$, avec un niveau d'incertitude de moins de 10 pour 100,⁷³ ce qui équivaut environ au forçage de tous les autres gaz à effet de serre réunis, et ce qui est sensiblement plus élevé que tout autre forçage. Le méthane est le gaz à effet de serre qui présente le deuxième forçage le plus élevé, soit $+0,48 W/m^2$, avec un niveau d'incertitude de 15 pour 100.⁷⁴ L'ozone troposphérique est le troisième gaz en importance avec un forçage estimatif de $+0,35 \pm 0,15 W/m^2$.⁷⁵ On

estime que le forçage solaire s'élève à $+0,3 \pm 0,2 \text{ W/m}^2$.⁷⁶ Le charbon noir issu de la combustion des carburants fossiles présente une contribution minime. Parmi certains des facteurs qui causent un refroidissement, on trouve l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique, les émissions de carbone organique provenant de la combustion de carburants fossiles et de la biomasse et les émissions de sulfate et d'autres aérosols. Les aérosols volcaniques émis après une éruption peuvent également causer un refroidissement significatif à court terme, mais il n'a pas été possible de leur attribuer une valeur pour toute la période allant de 1750 à 2000.

Sur quoi sont fondées les conclusions du GIEC?

Le GIEC a attribué un « niveau de compréhension scientifique », soit élevé, moyen, faible et très faible, à chaque forçage radiatif afin de décrire la mesure dans laquelle il fait confiance aux estimations numériques fournies. Il décrit les meilleures connaissances disponibles à propos de chaque forçage et précise les principales incertitudes ou limites qui y sont associées. Le GIEC précise que les estimations des forçages radiatifs des gaz à effet de serre bien mélangés sont fondées sur d'excellentes mesures de leurs concentrations et que l'on connaît très bien leurs propriétés radiatives. C'est pourquoi ces estimations font l'objet d'un niveau élevé de compréhension scientifique et présentent un niveau d'incertitude de moins de 10 pour 100 dans le cas du dioxyde de carbone⁷⁷ et de 10 pour 100 dans le cas des autres gaz.⁷⁸ Les estimations des forçages radiatifs de l'ozone stratosphérique et de l'ozone troposphérique font l'objet d'un niveau moyen de compréhension scientifique. Le GIEC ajoute que les aérosols, et leur incidence sur les nuages, et le forçage solaire se sont vus attribuer un très faible niveau de compréhension scientifique, vu le manque d'information et les fortes incertitudes dont ils font l'objet. Les satellites ont mesuré précisément et directement l'irradiation solaire depuis la fin des années 1970, tandis que des données substitutives, comme l'observation des taches solaires et la mesure des taux de carbone 14 et de béryllium dans les anneaux d'arbres et les carottes de glace, ont servi à estimer l'irradiation solaire pour les périodes antérieures.

2.3 Contributions de l'être humain au changement climatique

Dans son rapport de 2001, le GIEC conclut que de nouvelles preuves plus solides viennent corroborer la thèse voulant que le gros du réchauffement observé au cours des 50 dernières années soit attribuable à l'être humain. En ce qui a trait à l'influence de l'être humain sur le climat de la planète, le GIEC a déclaré qu'il était très peu probable que le réchauffement qui a eu lieu au cours des 100 dernières années ne soit attribuable qu'à des variabilités internes, comme l'estiment les modèles actuels. La reconstitution des données climatiques des 1 000 dernières années a permis de conclure que ce réchauffement était inhabituel et qu'il était peu probable qu'il soit entièrement d'origine naturelle.⁷⁹ Le GIEC a ajouté que de nouvelles estimations de la réaction du système climatique au forçage naturel et anthropique ont été réalisées et que de nouvelles techniques de détection ont été employées. Les activités de détection et les études d'attribution ont constamment décelé, dans les données climatiques des 35 à 50 dernières années, le signe de l'influence de l'être humain.⁸⁰

Le rapport que le NRC a remis en juin 2001 à la Maison Blanche aborde également cette question, et tisse un lien entre le changement climatique et l'être humain, mais n'en exprime pas la preuve absolue. Le sommaire du rapport indique que la conclusion du GIEC voulant que le gros du réchauffement observé au cours des 50 dernières années soit probablement attribuable à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre reflète avec précision les conclusions actuelles de la communauté scientifique à l'égard de cette question.⁸¹ Plusieurs pages plus loin, le rapport précise qu'en raison de l'incidence de la variabilité naturelle sur les données climatiques et de l'incertitude qui l'entoure toujours, et des incertitudes liées à la durée des différents forçages (plus particulièrement les aérosols), un lien de cause à effet entre l'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et les changements observés dans le climat au XX^e siècle ne peut être établi sans aucune équivoque. L'importance du réchauffement observé par rapport à la variabilité naturelle, telle que simulée dans les

modèles climatiques, suggère qu'un tel lien existe, mais il ne permet pas de le prouver, puisque la variabilité naturelle des modèles sur une décennie ou un siècle pourrait être imprécise.⁸²

Pour faire poindre l'influence de l'être humain sur le climat, les chercheurs ont comparé différents modèles de températures à l'échelle planétaire avec les températures observées à l'échelle mondiale au cours des 140 dernières années. La Figure 5 illustre le résultat de ces comparaisons. Lorsque les modèles ne simulaient que l'influence des variations solaires et des éruptions volcaniques pour cette période, les températures obtenues ne concordaient pas vraiment avec les températures observées. Lorsque les modèles ne simulaient que les influences de l'être humain (gaz à effet de serre, appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique et aérosols sulfatés), il était un peu plus facile d'établir une concordance avec les températures observées. Cependant, c'est lorsque l'on a combiné les influences naturelles et anthropiques que l'on a obtenu la concordance la plus étroite.⁸³

2.4 Débats concernant les facteurs naturels et anthropiques du changement climatique

Forçage solaire

L'influence que peut avoir la variation dans l'irradiation solaire, soit l'énergie solaire qui atteint la Terre, sur le réchauffement de la planète suscite un vif débat. L'irradiation solaire varie d'environ 0,1 pour 100 entre la période d'irradiation maximale et la période d'irradiation minimale pour chaque cycle de 11 ans et peut augmenter légèrement d'un cycle à l'autre.⁸⁴ Il s'agit toutefois là d'une variation trop minime pour causer un changement climatique.⁸⁵ Se fiant sur une reconstitution historique de l'irradiation solaire totale effectuée par plusieurs auteurs, le GIEC estime que le forçage solaire se situe entre +0,1 et +0,5 W/m² depuis 1750, tandis que le forçage radiatif des gaz à effet de serre bien mélangés s'élève à +2,43 W/m², avec un niveau d'incertitude de 10 pour 100.⁸⁶ Le GIEC ajoute que le forçage solaire peut avoir contribué en partie au réchauffement observé au cours de la première moitié du XX^e siècle, mais y a très peu contribué dans la deuxième moitié. Le GIEC estime que l'incidence nette de l'irradiation solaire et des volcans, tous deux des facteurs naturels, a été négative au cours des 20 à 40 dernières années.⁸⁷

Malgré le fait que les variations solaires mesurées soient relativement faibles, l'hypothèse du réchauffement solaire, alimentée par une étude réalisée en 1995 et selon laquelle il existait un lien étroit entre les températures substitutives et la durée des cycles solaires, continue d'être débattue.⁸⁸ Cependant, une étude réalisée en 1998 a mis en lumière plusieurs erreurs dans les données et l'analyse de l'étude de 1995, et a conclu qu'une analyse rajustée des mêmes données corroborait la thèse du GIEC voulant que le réchauffement de la planète soit attribuable à l'être humain.⁸⁹ Les sceptiques ont tout de même prétendu que l'étude de 1998 prouvait que les variations solaires avaient une incidence majeure sur le réchauffement de la planète⁹⁰, bien que ses auteurs se soient acharnés à expliquer que leurs conclusions ne devraient pas être considérées comme une preuve de l'incidence de l'activité solaire sur les températures terrestres.⁹¹

Les variations de l'irradiation solaire ne pourraient avoir une incidence majeure sur le climat que si elles avaient un effet indirect sur celui-ci, c'est-à-dire que l'irradiation solaire était d'une certaine façon amplifiée par un autre mécanisme. La possibilité que les variations dans les rayons cosmiques aient une incidence sur les températures par le biais d'un effet indirect sur la couverture nuageuse est une théorie qui a suscité beaucoup d'intérêt. Les rayons cosmiques sont des particules d'atomes à haute énergie qui proviennent du plus profond de notre galaxie et traversent notre système solaire. Selon une étude, il existerait un lien entre la présence de nuages et l'intensité des rayons cosmiques, bien que les auteurs de cette étude aient admis qu'il n'existait encore aucune preuve microphysique de l'existence de ce lien.⁹² Le GIEC a pris en considération cette étude et de nombreuses autres études des données sur le soleil et les nuages, et a conclu que l'incidence des rayons cosmiques sur les nuages n'avait pas été démontrée.⁹³ Le NRC a aussi conclu que malgré les nombreux forçages indirects possibles associés à la variabilité solaire qui ont été suggérés, seul un de ces forçages, les variations dans les concentrations d'ozone provoquées par les variations dans les rayons solaires ultraviolets, avait été démontré de façon

convaincante par le biais d'observations. Certaines études ont estimé que cet effet indirect augmentait le forçage solaire direct de $+0,1 \text{ W/m}^2$, mais cette valeur demeure très incertaine. Le forçage solaire est un phénomène très incertain, mais presque assurément plus faible que le forçage des gaz à effet de serre.⁹⁴

Autres causes naturelles possibles

Certaines personnes se demandent si les variations dans l'orbite terrestre ne pourraient pas être responsables du réchauffement actuel de la planète. De lentes variations régulières dans l'axe de rotation et dans l'orbite de la Terre (les cycles de Milankovitch) ont joué un rôle important dans les changements climatiques qui ont eu lieu au cours des dernières ères glaciaires. Cependant, ces changements se déroulent selon des cycles réguliers sur des milliers d'années et ne sont pas responsables du réchauffement actuel.

On a également suggéré que la réorganisation interne des courants atmosphériques et océaniques pouvait être responsable du réchauffement observé. Cependant, cette théorie ne semble pas concorder avec les observations effectuées. En effet, il a été directement observé que les océans se sont réchauffés en même temps qu'il y a eu pénétration descendante de chaleur à partir de la surface. De récentes études ont révélé que les océans agissaient probablement comme puits thermiques plutôt que comme sources de chaleur.⁹⁵

Hydrate de méthane

On a formulé une hypothèse voulant que le rejet d'hydrate de méthane, qui se forme naturellement sur le sol des régions polaires et dans les sédiments marins en dessous du plancher océanique, pourrait contribuer sensiblement au changement climatique. L'hydrate de méthane est un solide cristallin composé de molécules d'eau entourant des molécules de méthane. Une étude réalisée par le United States Geological Survey a conclu toutefois que l'hydrate de méthane ne contribuait probablement pas de manière significative au changement climatique parce que le gros du méthane qui pourrait être rejeté dans l'atmosphère était probablement converti en dioxyde de carbone et se dissolvait dans l'océan à mesure qu'il approchait de la surface. Ainsi, le gros de ce méthane n'atteint jamais l'atmosphère.⁹⁶ À l'occasion d'un test des dépôts d'hydrate de méthane réalisé dans la mer de Beaufort, très peu de méthane a été rejeté dans l'atmosphère, et une étude fondée sur un modèle de circulation mondiale a conclu que même dans le pire des scénarios, l'incidence du méthane sur le réchauffement futur de la planète serait minime. Le rapport de 2001 du GIEC souligne que l'analyse des données sur les carottes de glace n'avait révélé aucun rejet massif et rapide d'hydrate de méthane dans le passé.⁹⁷ Selon les quelques études revues par le GIEC, l'hydrate de méthane ne représentait pas plus de 2 pour 100 de toutes les sources naturelles et anthropiques de méthane.⁹⁸ De toute façon, le méthane ne contribue qu'à environ 20 pour 100 du forçage radiatif total attribuable aux gaz à effet de serre.

2.5 Débats concernant les preuves

Réchauffement interrompu dans l'hémisphère Nord de 1946 à 1975

Le rapport de 2001 du GIEC indique que l'hémisphère Nord s'est refroidi entre 1946 et 1975, tandis que l'hémisphère Sud s'est réchauffé.⁹⁹ Comme ce refroidissement a coïncidé avec la hausse rapide des émissions de gaz à effet de serre, certains chercheurs prétendent que ce phénomène infirme la théorie voulant que le changement climatique soit attribuable à l'être humain.¹⁰⁰ Cependant, selon le rapport que le NRC a remis à la Maison Blanche, ce refroidissement de l'hémisphère Nord peut avoir plusieurs causes, dont l'accumulation d'aérosols sulfatés due à la hausse rapide des émissions de soufre après la Deuxième Guerre mondiale, qui peut être attribuable à la rapide croissance industrielle et à la combustion accrue de charbon et de mazout. En fait, l'effet de refroidissement des émissions de soufre a progressé plus rapidement que l'effet de réchauffement des gaz à effet de serre, ce qui a contribué à freiner temporairement l'augmentation des températures mondiales moyennes. Le rapport remis à la Maison Blanche note également que le réchauffement observé au début du XX^e siècle, qui a été suivi par

une période de refroidissement, peut être d'origine naturelle et être attribuable à la variation des courants océaniques ou de la luminosité solaire ou à la fréquence des émissions volcaniques d'envergure.¹⁰¹

Le réchauffement observé est inférieur au réchauffement prévu

Certains critiques ont soulevé des préoccupations à propos de la fiabilité des modèles climatiques, les premiers modèles de ce genre prédisant en général des augmentations de températures plus prononcées que ce qui a été observé au cours du dernier siècle. Par exemple, le Dr S. Fred Singer a noté en 1999 que les observations effectuées à la surface au moyen de thermomètres conventionnels avaient dénoté une augmentation de la température d'environ 0,1 °C par décennie, soit moins de la moitié que ce qui avait été prédit par la plupart des modèles de circulation généraux.¹⁰²

Cependant, on soupçonne depuis longtemps que les aérosols refroidissent le climat, ce qui aurait pu facilement annuler la moitié de l'effet de réchauffement des gaz à effet de serre qui s'étaient déjà accumulés. Depuis le début des années 1990, ces effets ont été intégrés aux modèles climatiques et ont suffi à rapprocher les observations des projections de réchauffement. Selon le rapport de 2001 du GIEC, la plupart de ces études concluent que, au cours des 50 dernières années, le taux estimatif et l'ampleur du réchauffement attribuable aux concentrations accrues de gaz à effet de serre seulement sont comparables ou supérieurs au réchauffement observé. En outre, la plupart des modèles qui prennent en considération autant l'incidence des gaz à effet de serre que celle des aérosols sulfatés produisent des données conformes aux observations réalisées pour la période en question.¹⁰³

En outre, le NRC, dans le rapport qu'il a remis en juin 2001 à la Maison Blanche, n'était pas troublé par la différence entre le réchauffement prévu pour le XX^e siècle et le réchauffement observé. Selon celui-ci, le réchauffement qui devait survenir en raison de l'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère a été quelque peu plus prononcé que le réchauffement observé. Au moins une partie de ce réchauffement excédentaire a été pondérée par l'effet de refroidissement des aérosols sulfatés, et, de toute façon, il ne faudrait pas s'attendre à une correspondance exacte compte tenu de la variabilité naturelle.¹⁰⁴

Gaz à l'état de traces

Certaines personnes se demandent comment une augmentation des concentrations de dioxyde de carbone, un gaz qui ne représente que 0,037 pour 100 de tous les gaz atmosphériques, pourrait expliquer le réchauffement de la planète. L'azote et l'oxygène, qui compose 99 pour 100 des gaz atmosphériques, sont essentiellement perméables à la radiation et ne sont pas des gaz à effet de serre. Par contre, les gaz à effet de serre absorbent efficacement les rayons infrarouges. C'est pourquoi une augmentation relativement importante de leurs concentrations, bien que minime en termes absolus, peut avoir une incidence marquée sur le climat de la planète. En guise de comparaison, il suffit de se rappeler qu'une toute petite quantité de mercure ou de cyanure peut contaminer un vaste corps d'eau. Pareillement, l'ajout d'un tout petit peu de sel à de la glace modifie les propriétés de celle-ci, de sorte qu'elle se dissout en eau.

Liens entre les concentrations de dioxyde de carbone et les températures

Il est vrai que, tout comme le climat naturel de la Terre a connu des variations dans le passé, les niveaux de dioxyde de carbone ont également varié. Les niveaux de dioxyde de carbone étaient jusqu'à 20 fois plus élevés¹⁰⁵ il y a 150 à 200 millions d'années, mais le climat était beaucoup plus chaud et le niveau de la mer beaucoup plus élevé. Plus important encore, le GIEC a indiqué que les concentrations de dioxyde de carbone étaient manifestement inférieures à 300 ppmv il y a environ 20 millions d'années, et n'ont jamais dépassé ce niveau jusqu'à ce qu'elles commencent à augmenter au XIX^e siècle.¹⁰⁶ Les civilisations humaines se sont développées dans ces conditions atmosphériques.

Les sceptiques ont cité les conclusions de certaines études selon lesquelles les concentrations de dioxyde de carbone du passé n'étaient pas associées à des changements de température comme preuve que le changement climatique n'était pas attribuable au dioxyde de carbone. Une analyse des données tirées de

la carotte de glace de Vostok publiée en 1999 a conclu que les concentrations de dioxyde de carbone avaient augmenté de 200 à 1 000 années après le réchauffement rapide qui a eu lieu à la fin de chacune des trois dernières ères glaciaires.¹⁰⁷ Cependant, une autre équipe de scientifiques qui a étudié ces mêmes données a souligné qu'il était trop tôt pour conclure que les changements dans les concentrations de dioxyde de carbone précédaient ou suivaient les variations de température, vu les fortes incertitudes qui entourent l'écart entre la formation des glaces et l'emprisonnement des gaz, que l'on estime à $\pm 1\ 000$ ans et qui pourrait s'avérer davantage si l'on tient compte de l'incertitude liée au taux d'accumulation.¹⁰⁸ Le rapport de 2001 du GIEC a discuté de cette mise en garde et a conclu que, d'une façon ou d'une autre, les données tirées de la carotte de glace de Vostok prouvent l'existence d'une corrélation remarquable entre les concentrations de dioxyde de carbone et de méthane et les températures, celles-ci ayant augmenté et diminué conjointement suivant le même cycle au cours des 420 000 dernières années. Cela prouve, selon le GIEC, que le dioxyde de carbone a eu une incidence notable sur le changement climatique au cours des ères glaciaires en amplifiant le forçage initial attribuable aux variations dans l'orbite terrestre.¹⁰⁹

Une autre étude qui a reçu beaucoup d'attention en 1999 a estimé la température des anciennes mers tropicales jusqu'à il y a 550 millions d'années en analysant des coquillages fossilisés. Cette étude a mis en lumière deux épisodes particuliers où les températures à la surface des mers tropicales auraient été essentiellement froides. Ces épisodes auraient coïncidé avec des périodes où l'on croyait que les concentrations de dioxyde de carbone étaient élevées, ce qui a incité les auteurs de cette étude à mettre en doute la précision des concentrations historiques de dioxyde de carbone reconstituées et le rôle de ce gaz en tant que moteur principal du changement climatique dans le passé.¹¹⁰ En 2001, une autre équipe de recherche a constaté que les études précédentes avaient sous-estimé les températures pertinentes. En effet, la précision de la technique utilisée pour estimer celles-ci était affectée par la qualité des fossiles préservés, leur âge géologique et leur profondeur. Ils ont présenté de nouvelles données fondées sur des coquillages fossilisés beaucoup mieux préservés, ceux-ci ayant été enfouis dans des sédiments riches en argile. Ils ont déterminé que les températures à la surface des mers tropicales avaient été chaudes en même temps qu'il y avait eu augmentation des concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, et ont conclu que ces nouvelles preuves avalisaient la théorie voulant que de fortes concentrations de gaz à effet de serre aient contribué au réchauffement de la planète pendant ces périodes.¹¹¹

2.6 Causes de l'élévation récente du niveau de la mer

Le rapport de 2001 du GIEC note qu'il est très probable que le réchauffement survenu au XX^e siècle ait sensiblement contribué à l'élévation observée du niveau de la mer en raison de l'expansion thermique de l'eau de mer et de la fonte généralisée de la glace sur terre.¹¹² Parmi les processus et les éléments contribuant à l'élévation du niveau de la mer et examinés par le GIEC, on trouve l'expansion thermique, les glaciers et les calottes polaires, les calottes de glace, le pergélisol, les dépôts de sédiments et le stockage terrestre. Les variations dans l'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle de la planète peuvent découler des changements dans la densité de l'eau ou dans la masse totale de celle-ci. Ces variations de densité et de masse peuvent être causées par le climat et le changement climatique anthropique.

Il y a expansion thermique lorsque la densité de l'eau diminue à mesure que l'océan se réchauffe. Ainsi, pour une masse constante, le volume de l'océan augmente. Le GIEC a conclu que l'expansion thermique était l'une des principales causes de l'élévation du niveau de la mer au XX^e siècle, et qu'elle continuerait d'y contribuer au cours des 100 prochaines années.¹¹³ Les scientifiques estiment qu'en moyenne au cours du XX^e siècle, l'expansion thermique a contribué de 0,3 à 0,7 millimètre par année à l'élévation du niveau de la mer. Les modèles climatiques présument que le taux d'expansion thermique s'est accéléré pour atteindre de 0,7 à 1,1 millimètre par année au cours des dernières décennies. Ces chiffres sont similaires à de récentes estimations, fondées sur des observations, d'environ 1 millimètre par année.¹¹⁴

Les glaciers, les calottes polaires et les calottes de glace ont une incidence sur la masse des océans et donc sur le niveau de la mer. Après l'expansion thermique, la fonte des glaciers et des calottes polaires représente la plus importante contribution de l'être humain à l'élévation du niveau de la mer, et on s'attend à ce que cela se poursuive au cours des 100 prochaines années. Certaines études ont laissé entendre qu'au cours des cent dernières années, la diminution de la taille des glaciers et des calottes polaires avait contribué de 0,2 à 0,4 millimètre par année à l'élévation du niveau de la mer.¹¹⁵

Les calottes de glace du Groenland et de l'Antarctique sont des masses d'eau douce glacée de la taille d'un continent formées par l'enfouissement et la densification de la neige. Il est à noter qu'un changement minime de leur bilan massique aurait une grande incidence sur l'élévation du niveau de la mer.¹¹⁶ Seul le bilan massique des calottes de glace qui reposent sur le substratum rocheux doit être pris en considération, étant donné que les variations des plates-formes de glace flottantes, qui sont déjà en mer, n'ont aucune incidence sur le niveau de la mer. Les variations dans le volume des calottes de glace par voie d'ablation glaciaire, qui s'entend de la fonte ou de la rupture de glaces de la terre jusqu'à la mer sous forme de plates-formes de glace flottantes ou d'icebergs, auront une incidence sur le niveau de la mer. Cependant, cela prend des centaines d'années avant que de telles variations n'aient une incidence sur le niveau de la mer. Il faudra attendre des siècles avant que le changement climatique anthropique du XX^e siècle n'ait une incidence majeure sur le Groenland et l'Antarctique.

Les scientifiques estiment que la calotte de glace du Groenland a contribué de 0,0 à 0,1 millimètre par année à l'élévation du niveau de la mer durant le XX^e siècle,¹¹⁷ ce qui signifie que cette calotte de glace est presque en équilibre depuis plusieurs décennies.¹¹⁸ Cette contribution à l'élévation du niveau de la mer est le résultat d'une accumulation et d'une ablation accrues. Bien que le Groenland n'ait que très peu contribué à l'élévation du niveau de la mer à ce jour, on s'attend à ce que les répercussions du changement climatique sur les calottes de glace se fassent sentir sur des centaines d'années.

La calotte de glace de l'Antarctique occidentale a reçu beaucoup d'attention récemment en raison des morceaux de glace qui se sont détachés de la plate-forme de glace flottante de Larsen dans la péninsule antarctique.¹¹⁹ Les déséquilibres locaux ont des incidences positives et négatives sur l'élévation du niveau de la mer.¹²⁰ Cependant, on croit que la calotte de glace de l'Antarctique occidentale n'a à l'heure actuelle aucune incidence majeure sur l'élévation du niveau de la mer.¹²¹ On croit également que la calotte de glace de l'Antarctique orientale n'a pas récemment contribué à l'élévation du niveau de la mer.¹²² Le GIEC suggère que l'Antarctique a contribué de -0,2 à 0,0 millimètre par année à l'élévation du niveau de la mer au cours du XX^e siècle.¹²³ Certains chercheurs basent leur opposition au changement climatique sur ces données. Cependant, on croit que l'augmentation possible du bilan massique de l'Antarctique est attribuable aux niveaux de précipitation accrus découlant des variations dans les courants atmosphériques liées au changement climatique.¹²⁴

Les processus géologiques naturels ont aussi une incidence sur l'élévation du niveau de la mer. La surface terrestre se relève encore par endroits suite au recul des glaciers qui a suivi la dernière ère glaciaire. Selon le GIEC, les modèles glaciaires des dernières 500 années estiment que le Groenland et l'Antarctique ont contribué de 0,0 à 0,5 millimètre par année à l'élévation du niveau de la mer en raison des rajustements à long terme ayant suivi la dernière déglaciation.¹²⁵ On s'attend à ce que ces calottes de glace continuent de contribuer à cette élévation, tout comme le changement climatique du XX^e siècle y contribue.

On estime que le ruissellement lié à la fonte du pergélisol n'a contribué que de 0,0 à 0,05 millimètre par année à l'élévation du niveau de la mer au cours du XX^e siècle.¹²⁶ Les variations non climatiques dans l'emmagasinement des eaux de surface et souterraines peuvent aussi avoir une incidence sur l'élévation du niveau de la mer, mais dans une moindre mesure. Le GIEC a observé que le prélèvement d'eau souterraine dans des aquifères à un rythme dépassant le taux de réalimentation naturelle de ceux-ci avait le plus d'incidence sur cette élévation.¹²⁷ La déforestation accélérée et l'intensification des eaux de ruissellement

attribuables à l'urbanisation contribuent également à l'élévation du niveau de la mer.¹²⁸ On estime que ces activités, y compris la réalimentation des sources d'eau, ont contribué de -1,1 à 0,4 millimètre par année à l'élévation du niveau de la mer au cours du XX^e siècle.¹²⁹

Le GIEC a examiné les estimations d'un certain nombre de modèles et a conclu que le taux estimé d'élévation du niveau de la mer attribuable au changement climatique anthropique (expansion thermique, glaciers, calottes polaires et variations dans les calottes de glace liées au changement climatique survenu au cours du XX^e siècle) allait de 0,3 à 0,8 millimètre par année, comparativement à un apport naturel allant de -1,1 à 0,9 millimètre par année. Le GIEC a noté que l'éventail de l'apport naturel à l'élévation du niveau de la mer était moindre que la limite inférieure de l'élévation observée du niveau de la mer, soit de 1 à 2 millimètres par année, ce qui suggère que le changement climatique du XX^e siècle a eu une incidence sur l'élévation du niveau de la mer au cours de ce siècle.¹³⁰

2.7 Conclusion

Il ne fait aucun doute que les émissions anthropiques de gaz à effet de serre ont accru la quantité de ces gaz dans l'atmosphère. Les scientifiques ont étudié les facteurs humains et naturels auxquels le changement climatique pourrait être attribuable et ont conclu que l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre, plus particulièrement le dioxyde de carbone, était le plus important de tous ces facteurs. Le forçage solaire peut également y avoir contribué, particulièrement au cours de la première moitié du XX^e siècle, mais son incidence actuelle sur le changement climatique est beaucoup plus faible que celle des gaz à effet de serre. Les scientifiques croient aussi que le changement climatique anthropique a contribué à l'élévation du niveau de la mer. Les scientifiques s'entendent de plus en plus pour dire que le changement climatique observé est attribuable aux activités humaines, plus particulièrement à la combustion de carburants fossiles.

Déclarations faites par des organismes scientifiques sur le changement climatique	
<i>Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat</i>	D'après la prépondérance des preuves, qu'il s'agisse des variations dans les températures mondiales moyennes de surface ou des variations géographiques, saisonnières et verticales des températures, l'être humain a une incidence discernable sur le climat mondial. À la lumière des nouvelles preuves recueillies et compte tenu des incertitudes qui demeurent, le gros du réchauffement observé au cours des 50 dernières années est probablement attribuable à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre.
<i>U.S. National Research Council, National Academy of Sciences</i>	L'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre est attribuable à l'être humain et est la cause de l'augmentation des températures à la surface de la Terre et dans les océans. Et ces températures augmentent bel et bien. Les changements observés au cours des dernières décennies sont probablement et essentiellement attribuables à l'être humain, bien que nous ne puissions exclure le fait qu'une grande partie de ces changements soit aussi attribuable à la variabilité naturelle.
<i>Société royale du Canada</i>	Avec la publication du deuxième rapport d'évaluation du GIEC, le changement climatique ne peut plus être écarté pour cause d'incertitude scientifique.
<i>Royal Society (Royaume-Uni)</i>	L'analyse des données pour l'hémisphère Nord révèle que la hausse des températures qui a eu lieu au cours du XX ^e siècle est probablement la plus importante hausse de température séculaire des mille dernières années. L'augmentation des températures des 50 dernières années est en grande partie attribuable au forçage anthropique (variations dans le bilan radiatif de la Terre) lequel est lié aux hausses des concentrations de gaz à effet de serre. Cette augmentation des températures a été accompagnée d'un certain refroidissement causé par des particules de sulfate liées à la hausse des émissions de dioxyde de soufre, et d'un faible forçage naturel (attribuable aux volcans et aux variations dans l'irradiation solaire).

SECTION 3 – Projections des futurs changements climatiques

D'ici la fin du XXI^e siècle, selon la plupart des scénarios du statu quo, les concentrations de gaz à effet de serre pourraient grimper à des niveaux plusieurs fois plus élevés qu'avant l'ère industrielle. Des modèles informatiques s'appuyant sur une série de données d'observation prévoient que d'importants changements climatiques auront probablement lieu. Le GIEC prévoit que la température mondiale moyenne augmentera de 1,4 à 5,8 °C entre 1990 et 2100.¹³¹ En comparaison, le taux de réchauffement qui a suivi la dernière ère glaciaire était beaucoup plus lent, soit d'environ 2 °C par millénaire.¹³²

La projection des futurs changements climatiques nécessite un certain nombre d'étapes particulières :

- Premièrement, la projection des futures émissions de gaz à effet de serre (qui contribuent au réchauffement) et d'aérosols (dont la plupart ont un effet de refroidissement);
- Deuxièmement, la projection de l'accumulation de dioxyde de carbone (et d'autres gaz à effet de serre) dans l'atmosphère tirée d'un scénario donné sur les émissions;
- Troisièmement, le calcul du réchauffement graduel du climat en réaction à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre;
- Quatrièmement, le calcul des rétroactions entre le changement climatique et l'accumulation des gaz à effet de serre.

L'exécution de ces étapes et les preuves sur lesquelles s'appuient les projections sur le changement climatique sont décrites brièvement ci-après.

3.1 Modèles économiques s'appliquant aux scénarios sur les futures émissions

Pour projeter les futures émissions, il faut formuler un certain nombre d'hypothèses à propos de la croissance de l'économie mondiale; de la mesure dans laquelle l'efficacité de la transformation et de l'utilisation de l'énergie s'améliorera au fil du temps; du lien entre le revenu et la demande en énergie et entre le prix et la demande en énergie; et de la disponibilité et du coût des différentes formes d'énergie. À partir de ces hypothèses, il est possible de calculer la consommation totale d'énergie sous différentes formes, dont les carburants fossiles et les sources d'énergie renouvelable. Enfin, les émissions de toute une série de gaz à effet de serre, de polluants et de précurseurs aux aérosols sont calculées. Des modèles informatiques sont établis pour procéder à toutes ces étapes de manière uniforme, mais les données que produiront les modèles dépendent en grande partie des hypothèses sélectionnées. Ces modèles sont néanmoins utiles, puisqu'ils permettent aux analystes d'examiner les conséquences d'une série d'hypothèses particulières. Ils décrivent, en termes macroéconomiques, ce qu'il faudrait faire pour en arriver à un avenir différent pour ce qui est de la consommation d'énergie et de la production de gaz à effet de serre et de polluants.

Avant la rédaction de son troisième rapport d'évaluation, le GIEC a demandé la préparation d'un vaste éventail de scénarios sur les émissions, ceux-ci ayant été publiés sous le titre *Special Report on Emission Scenarios*¹³³ (les scénarios SRES). Les scénarios SRES sont répartis selon quatre « synopsis » différents, chaque synopsis comportant une série d'hypothèses interdépendantes ayant trait à la population, au bien-être social et économique, au commerce et aux préoccupations générales environnementales. Ces synopsis sont désignés sous les codes A1, A2, B1 et B2. Les synopsis « A » ne prévoient aucun effort explicite pour réaliser une plus grande équité et justice sociale d'ordre international, tandis que les synopsis « B » prévoient de tels efforts. Enfin, les synopsis « 1 » représentent un milieu assez homogène (mondialisation, commerce maximal, érosion des différences régionales) et les synopsis « 2 » représentent un milieu plus hétérogène.

Par exemple, le synopsis B2 représente un milieu qui applique des solutions locales aux problèmes économiques, environnementaux et sociaux; dont la population augmente continuellement, mais à un

rythme plus lent que la société décrite dans le synopsis A2; dont le développement économique se fait à un niveau intermédiaire; et dont le développement technologique est moins rapide et plus diversifié que la société décrite dans le synopsis A1 ou B1. En outre, le synopsis A1 est réparti en d'autres synopsis, soit celui décrivant un milieu à forte dépendance sur les carburants fossiles (le synopsis A1F), celui décrivant un milieu à forte dépendance sur les systèmes avancés d'énergie à base de biomasse (le synopsis A1T) et celui décrivant un milieu où sont consommés carburants fossiles et énergie à base de biomasse (le synopsis A1B). Cependant, aucun des synopsis ne prévoit la prise de mesures délibérées pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, et c'est pourquoi ils sont tous considérés comme des scénarios plausibles du statu quo. Chaque synopsis comporte une série de projections ayant trait aux futures émissions de dioxyde de carbone découlant de la consommation d'énergie, comme l'illustre la Figure 6.

L'incertitude à propos des futures émissions de gaz à effet de serre nourrit l'incertitude à propos du changement climatique. Cependant, cette incertitude découle du fait que les futures émissions de gaz à effet de serre sont encore, dans une large mesure, une question de choix. Nous ne savons toutefois pas quels seront ces choix. Selon l'une des principales conclusions des scénarios SRES et des études connexes sur la dynamique des changements technologiques, le futur système d'énergie mondial pourrait prendre deux formes très différentes, et évoluer en un système axé soit sur les carburants fossiles, soit sur l'énergie renouvelable. Cependant, plus l'on progresse dans une direction ou dans une autre, plus il sera difficile de changer de direction.

3.2 Utilisation de modèles du cycle du carbone pour calculer l'accumulation de dioxyde de carbone

Avec un scénario des émissions de dioxyde de carbone, l'accumulation des concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère peut être calculée avec assez de précision à l'aide d'un *modèle informatisé du cycle de carbone*. Les modèles du cycle de carbone calculent le taux d'absorption d'une partie des concentrations de dioxyde de carbone émises par les puits de carbone naturels, c'est-à-dire la biosphère terrestre (principalement les forêts) et les océans. Bien que nous disposions de connaissances précises sur la quantité de dioxyde de carbone qui s'accumule dans l'atmosphère chaque année (environ 3,2 gigatonnes (Gt) ou milliards de tonnes de carbone par année durant les années 1990) et sur les émissions annuelles de carburants fossiles (environ 6,3 Gt de carbone par année au cours des années 1990), les émissions attribuables à la déforestation et aux autres variations dans la couverture terrestre sont incertaines (1,6 Gt de carbone par année $\pm 1,0$ Gt).¹³⁴ Selon de nombreuses méthodes de calcul, les océans absorbent environ 2,0 Gt de carbone par année à l'heure actuelle,¹³⁵ ce qui sous-entend que les plantes et le sol absorbent de 1 à 4 Gt de carbone par année environ. Puisque la différence entre les émissions totales de carbone et la hausse observée des concentrations de carbone dans l'atmosphère est absorbée par les puits de carbone biosphériques et océaniques, l'incertitude qui entoure les émissions attribuables aux variations dans la couverture terrestre suppose une incertitude similaire en ce qui concerne l'incidence totale de ces puits.

À mesure que l'augmentation anthropique des concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère se poursuit, on s'attend essentiellement à ce que l'absorption de ce gaz par la biosphère terrestre s'amenuise, peut-être même au point de devenir une source nette de dioxyde de carbone.¹³⁶ Plusieurs facteurs expliquent ce phénomène, dont l'accumulation de carbone et d'ordures dans le sol qui sont retournés dans l'atmosphère par le biais de la respiration des plantes, un ralentissement dans le taux d'accroissement de la photosynthèse à mesure que la hausse des concentrations de dioxyde de carbone se poursuit et l'incidence perturbatrice des changements climatiques rapides sur les écosystèmes naturels.

Si les émissions de dioxyde de carbone augmentent rapidement, le puits de carbone océanique aura tendance à croître plus lentement que ces émissions, et ce, pour des raisons qui sont liées aux caractéristiques fondamentales et bien comprises de la chimie des océans.¹³⁷ Ainsi, si l'affaiblissement du puits de carbone terrestre est combiné à la faible croissance du puits océanique, et si les émissions

continuent d'augmenter à un rythme exponentiel, une fraction accrue des émissions supplémentaires annuelles de dioxyde de carbone apparaîtra sous forme d'augmentation annuelle des concentrations de dioxyde de carbone, ce qui aura pour effet d'en accroître l'accumulation dans l'atmosphère. En dépit des incertitudes qui entourent le puits biosphérique et (dans une moindre mesure) le puits océanique, celles-ci ont une incidence beaucoup moindre que les incertitudes qui entourent les différents scénarios d'émissions. Par conséquent, le principal facteur déterminant de l'importance des futures concentrations de dioxyde de carbone demeure les choix des sociétés quant à l'alimentation et la consommation énergétiques.

L'accumulation d'autres gaz à effet de serre doit également faire l'objet de simulations, mais l'élaboration de modèles pour d'autres gaz est un exercice beaucoup plus direct, et moins incertain, que l'élaboration de modèles sur l'accumulation de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. La chaleur retenue par ces gaz est ajoutée à la chaleur retenue par le dioxyde de carbone, et le résultat est un *équivalent* climatique du doublement des concentrations de dioxyde de carbone, par exemple, dès 2030,¹³⁸ bien que les concentrations de dioxyde de carbone en tant que telles ne doubleront que vers 2040-2050 (par rapport aux concentrations préindustrielles de 280 ppmv).

3.3 Modèles climatiques servant à calculer le changement climatique survenu

Avec un scénario prévoyant l'accumulation du dioxyde de carbone, d'autres gaz à effet de serre et d'aérosols, il est possible de déterminer les futurs changements climatiques à l'aide d'un *modèle climatique*. La *sensibilité du climat* est le paramètre le plus important dont il faut tenir compte pour mesurer la réaction du système climatique à l'accumulation d'un gaz à effet de serre donné. La sensibilité du climat est le rapport entre la variation de la température d'équilibre moyenne à l'échelle mondiale et le forçage radiatif moyen à l'échelle mondiale. Le terme « réchauffement à l'équilibre » s'entend de l'ampleur du réchauffement une fois que le climat a eu l'occasion de s'ajuster entièrement à un changement donné et imposé dans le bilan radiatif (réchauffement produit, par exemple, par une augmentation des concentrations de gaz à effet de serre). Il est commun de décrire le réchauffement mondial moyen à l'équilibre pour un doublement des concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère comme la sensibilité du climat.

Une fois que les modélisateurs en climatologie ont sélectionné un scénario décrivant l'accumulation de gaz à effet de serre et d'autres facteurs qui ont une incidence sur le climat, et qu'ils ont estimé la sensibilité du climat et la période pendant laquelle les océans retarderont le réchauffement, il s'agit alors simplement de calculer la variation dans la température mondiale moyenne sur une certaine période.¹³⁹ Plus la sensibilité du climat est grande, plus le réchauffement éventuel du climat sera important et plus il se produira rapidement. Pareillement, plus la hausse du forçage radiatif est grande, plus le réchauffement du climat sera important et rapide. Par contre, l'absorption de chaleur par les océans peut ralentir, mais ne peut freiner, un réchauffement éventuel.

On peut estimer la sensibilité du climat de trois manières indépendantes l'une de l'autre. La première est d'utiliser des modèles complexes tridimensionnels de l'atmosphère et de ses liens avec la surface terrestre, les océans, la neige et la glace. Ces modèles – qui portent le nom de modèles de circulation générale de l'atmosphère – visent à calculer l'incidence des principales rétroactions climatiques qui permettent collectivement de déterminer la sensibilité du climat. Ces principales rétroactions sont les suivantes : (i) l'augmentation de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère attribuable au réchauffement du climat (la vapeur d'eau étant un gaz à effet de serre, toute augmentation de sa quantité contribue au réchauffement de la planète); (ii) la fonte de la neige et de la glace attribuable au réchauffement du climat (ce qui favorise l'absorption de l'irradiation solaire et accroît le réchauffement surtout à haute latitude); et (iii) les changements dans les propriétés des nuages. La vapeur d'eau est l'une des principales rétroactions climatiques, mais, malheureusement, il n'est pas possible d'observer l'ampleur de cette rétroaction sur les changements climatiques à long terme. Cependant, les processus où la vapeur d'eau et ses variations sont présentes de concert avec des phénomènes comme El Niño et le cycle saisonnier normal peuvent être

observés, et les modèles climatiques actuels se comparent bien aux observations effectuées à cet égard. Les nuages sont la principale source d'incertitude dans les calculs de la sensibilité du climat. Selon de récents modèles, l'équilibre de la sensibilité du climat se situe entre 2 °C et 5 °C environ.¹⁴⁰

La deuxième façon de calculer la sensibilité du climat est de comparer le réchauffement mondial moyen au cours du dernier siècle, tel que simulé par des modèles climatiques simples utilisant différentes sensibilités du climat, avec le réchauffement observé. Des sensibilités du climat qui correspondent mieux au réchauffement observé sont davantage plausibles que des sensibilités du climat qui sous-estiment ou surestiment nettement ce réchauffement. Pour en arriver là, il faut tenir compte de tous les facteurs qui ont eu une incidence sur les variations de température au cours du dernier siècle, y compris les variations dans l'énergie solaire, les éruptions volcaniques et l'effet de refroidissement des aérosols. À l'aide cette approche, une équipe de chercheurs a déduit que la véritable sensibilité du climat se situait très probablement entre 1 °C et 5 °C, sa valeur la plus probable se trouvant entre 2 °C et 3 °C.¹⁴¹

La troisième façon de calculer la sensibilité du climat est d'estimer les variations de la température mondiale moyenne et le forçage radiatif mondial moyen aux époques où le climat terrestre était nettement plus froid ou plus chaud qu'il ne l'est actuellement. La sensibilité du climat est tout simplement le rapport entre ces deux quantités. On a utilisé cette approche en se servant de données tirées du Crétacé (qui a pris fin il y a 65 millions d'années), époque à laquelle le climat de la Terre était beaucoup plus chaud et les concentrations de dioxyde de carbone, beaucoup plus élevées qu'à l'heure actuelle, et de données tirées de la période de pointe de la dernière ère glaciaire (il y a 18 000 ans), au moment où le climat de la Terre était beaucoup plus froid et les concentrations de dioxyde de carbone moins élevées qu'à l'heure actuelle. Il est intéressant de noter que la sensibilité du climat estimée grâce à cette méthode est environ la même, peu importe que l'on utilise les données du Crétacé ou celles de la dernière ère glaciaire. Si cette sensibilité du climat est alors multipliée par le forçage radiatif du doublement des concentrations de dioxyde de carbone, le réchauffement prévu attribuable au doublement du dioxyde de carbone sera d'environ 1 °C à 3 °C.¹⁴²

Il y a donc trois méthodes indépendantes les unes des autres pour estimer la sensibilité du climat, et elles se chevauchent dans une large mesure. Vu le chevauchement des preuves, le GIEC, dans sa plus récente évaluation, n'a pas modifié son estimation antérieure relativement à la sensibilité du climat, qui se situe selon lui entre 1,5 °C et 4,5 °C. Dans la plupart des scénarios du statu quo, les concentrations de gaz à effet de serre pourraient équivaloir à plusieurs fois les concentrations de l'ère préindustrielle d'ici la fin du présent siècle. Avec une sensibilité du climat attribuable au doublement des concentrations de dioxyde de carbone se situant entre 1,5 °C et 4,5 °C, ces scénarios prévoient d'importants changements climatiques.

3.4 Rétroactions du cycle climat-carbone

À mesure que le climat se réchauffera en raison de l'augmentation des concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, le cycle naturel du dioxyde de carbone s'en trouvera altéré, ce qui modifiera alors le niveau des concentrations subséquentes de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et les changements climatiques subséquents, formant ainsi une rétroaction du cycle climat-carbone. Il existe de nombreuses rétroactions possibles du cycle climat-carbone, et la plupart d'entre elles sont des rétroactions positives, c'est-à-dire qu'un réchauffement initial modifie le cycle de carbone d'une façon telle à accroître davantage les concentrations de dioxyde de carbone, contribuant ainsi encore plus au réchauffement de la planète (au-delà du réchauffement initial).¹⁴³

3.5 Tendances et caractéristiques régionales du changement climatique

Pour prévoir les tendances régionales du changement climatique, les chercheurs utilisent des modèles tridimensionnels – les modèles de circulation générale de l'atmosphère décrits à la section 3.3. Il existe un grand nombre de modèles complexes de ce genre. Les caractéristiques à grande échelle du changement

climatique figurant dans ces modèles concordent les unes avec les autres, ces caractéristiques pouvant être décrites en des principes très simples et fondamentaux. Les caractéristiques générales des changements simulés du climat sont donc fiables. Les caractéristiques qui suscitent un large consensus et une grande confiance sont les suivantes :¹⁴⁴

- le réchauffement sera plus intense à haute latitude qu'à basse latitude, et ce, en raison de la fonte saisonnière de glace et de neige;
- le réchauffement tendra à être plus intense pendant l'hiver que pendant l'été au-dessus et à proximité des océans à haute latitude en raison de l'amincissement de la glace marine;
- les chutes de pluie auront davantage tendance à s'intensifier (c'est-à-dire que la pluie tombera davantage sous forme de pluie diluvienne);
- le temps sera plus sec en été à l'intérieur de la plupart des continents à latitude moyenne, avec un risque accru de sécheresse.

La fertilisation par le dioxyde de carbone entraînera-t-elle la création d'un paradis terrestre?

Des expériences menées dans des serres ont permis d'établir clairement que des concentrations plus élevées de dioxyde de carbone tendaient à stimuler la croissance des plantes en facilitant la photosynthèse et en améliorant l'absorption d'eau. Dans le cadre de ces expériences, on a constaté qu'une augmentation de 100 pour 100 dans les concentrations de dioxyde de carbone donnait typiquement lieu à une augmentation de 40 à 70 pour 100 du taux de photosynthèse.¹⁴⁵ Cela amène par conséquent certains à prétendre que l'augmentation des concentrations de dioxyde de carbone favorisera la croissance d'une végétation abondante sur Terre et la productivité biologique, soit la création d'un véritable paradis terrestre. Puisque que l'on estime que le taux naturel de photosynthèse à l'échelon de la planète permet d'absorber environ 60 milliards de tonnes de carbone par année, et étant donné que les concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère ont déjà augmenté de 30 pour 100, une photosynthèse accrue favoriserait l'absorption de 7 à 15 milliards de tonnes de dioxyde de carbone de plus par année.

Cependant, les scientifiques soulignent que les résultats d'expériences réalisées en serre ne peuvent simplement être appliqués au milieu naturel. Il suffit simplement d'examiner l'équilibre de base entre le dioxyde de carbone introduit dans l'atmosphère et absorbé par celle-ci pour s'en rendre compte. Chaque année, l'être humain introduit actuellement dans l'atmosphère environ 6,3 milliards de tonnes de dioxyde de carbone attribuables à la combustion de carburants fossiles et de 0,6 à 2,5 milliards de tonnes attribuables aux variations dans l'utilisation du sol, pour un total d'environ 7 à 9 milliards de tonnes.¹⁴⁶ L'augmentation observée des concentrations de dioxyde de carbone est d'environ 3,2 milliards de tonnes par année, les océans pouvant en absorber de 1,3 à 2,5 milliards de tonnes par année. La différence entre, d'une part, les émissions attribuables à la combustion de carburants fossiles et aux variations dans l'utilisation du sol, et, d'autre part, l'augmentation annuelle des concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et la quantité de dioxyde de carbone absorbée par les océans doit être absorbée en grande partie par la végétation terrestre par le biais d'une photosynthèse accrue, l'incidence même que devrait avoir la hausse des concentrations de dioxyde de carbone. D'après les données ci-dessus, la végétation terrestre absorbe environ de 1 à 4 milliards de tonnes de dioxyde de carbone par année, ce qui est de beaucoup moindre que les 7 à 13 milliards de tonnes qui devraient être absorbées par année suivant l'application simpliste des expériences réalisées en serre dans le monde réel. Il est donc manifeste que les écosystèmes ne réagissent pas de manière aussi favorable à la hausse des concentrations de dioxyde de carbone que ne le fait un milieu idéal reproduit dans une serre. Tel qu'expliqué dans la section 3.2, les scientifiques s'attendent à ce que le taux actuel relativement faible d'absorption du dioxyde de carbone s'amenuise au fil des ans.

Parmi les autres éléments des changements climatiques simulés qui suscitent encore des débats considérables et beaucoup d'incertitude, mais qui sont d'une importance cruciale aux sociétés humaines et aux écosystèmes naturels, citons les suivants :

- les variations dans l'intensité et la fréquence d'El Niño;
- les variations dans l'intensité et la fréquence des orages tropicaux;
- un effondrement possible du Gulf Stream, qui amène actuellement de l'eau chaude vers l'Europe occidentale.

3.6 Les modèles climatiques sont-ils fiables?

Certains prétendent parfois que les modèles climatiques sont trop peu fiables pour pouvoir servir de base à l'adoption de politiques sur le réchauffement de la planète, et plus particulièrement les politiques qui nécessitent que des changements significatifs soient apportés à notre réseau énergétique. Différentes raisons sont citées pour expliquer ce manque de fiabilité, dont la prétendue incapacité des modèles climatiques à simuler les changements climatiques observés au cours du dernier siècle, les désaccords concernant les changements climatiques prévus à l'échelon régional, et l'utilisation – dans certains modèles climatiques atmosphériques-océaniques – d'une procédure connue sous le nom de « rajustement des flux ».

Le fait que les modèles climatiques ne représentent qu'une preuve parmi tant d'autres sur lesquelles les préoccupations des scientifiques concernant les gaz à effet de serre sont fondées est la première chose dont il faut se rappeler. Ainsi, certaines observations très fondamentales appuient manifestement et de façon convaincante la théorie du changement climatique. Ainsi, il existe un vaste effet de serre naturel grâce auquel la température est d'environ 33 °C plus élevée en moyenne qu'elle ne le serait autrement. Les concentrations de plusieurs des principaux gaz contribuant à ce vaste effet de serre ont augmenté sensiblement au cours des cent à deux cent dernières années. On s'attend à ce que cette seule augmentation ait une grande incidence sur notre climat. Selon de nombreuses observations, il semble que ces augmentations soient directement attribuables à l'être humain. À toutes fins pratiques, la hausse des concentrations de dioxyde de carbone est essentiellement irréversible. L'augmentation de la température mondiale moyenne observée au cours du dernier siècle a été rapide et est sans précédent au cours des 1 000 dernières années, et l'accroissement des concentrations de gaz à effet de serre est la seule explication plausible de ce réchauffement.

Le principal paramètre que les modélisateurs en climatologie utilisent est la sensibilité du climat, et, encore une fois, on utilise une combinaison de résultats (issus de modèles), d'observations et d'inférences tirées des climats du passé pour restreindre la valeur de ce paramètre. Même une sensibilité du climat des plus minimales – seulement 1 °C de réchauffement mondial moyen pour un doublement du dioxyde de carbone – combinée à la possibilité que les concentrations de gaz à effet de serre équivalent de 3 à 4 fois les concentrations préindustrielles d'ici 2100, entraînerait une augmentation de la température mondiale moyenne de 2 °C d'ici la fin du siècle. Bien qu'une telle augmentation puisse avoir un grand impact, il est *possible* que le changement climatique soit beaucoup plus prononcé.

Les modélisateurs en climatologie soulignent que les éléments les plus fondamentaux des modèles peuvent être compris sous forme de principes de base bien établis. Ainsi, les éléments les plus importants ne sont pas reliés aux particularités de modèles informatiques complexes et difficiles à comprendre. Ce sont dans les détails des changements particuliers devant survenir dans des lieux particuliers que les modèles présentent le plus de divergences. Certaines régions peuvent en effet tirer profit des premières étapes du réchauffement de la planète, tandis que d'autres en souffriront. Cependant, personne ne peut prétendre en toute confiance qui seront ces gagnants et perdants. *Tout le monde* court donc des risques.

En outre, plus le réchauffement sera important, plus les risques seront grands et plus les incidences négatives de ce réchauffement seront répandues.

L'allégation selon laquelle les modèles informatiques ne peuvent simuler les aspects généraux des changements climatiques observés n'est tout simplement pas fondée. Les modélisateurs en climatologie soulignent que leurs modèles décrivent très bien les aspects généraux des changements climatiques observés à l'échelon régional, comme le réchauffement minime ou léger refroidissement observé dans le nord-ouest de l'océan Atlantique et dans certaines régions de l'Antarctique.

Certains des premiers modèles climatiques atmosphériques-océaniques avaient tendance à simuler, après un certain nombre de siècles, des états climatiques tout à fait irréalistes. Pour prévenir cela, des rajustements ont été apportés à la circulation régionale de la chaleur et de l'humidité entre l'atmosphère et les océans (de façon à ce qu'ils s'annulent l'un l'autre à l'échelon mondial), et ce, parce que les *changements* simulés du climat attribuables à certaines perturbations, comme l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre, sont étroitement reliés au climat initial. Ainsi, si ce climat initial est irréaliste, les changements climatiques seront erronés. Ce processus est connu sous le nom de *rajustement des flux*. Nombre des modèles actuels sont maintenant suffisamment précis pour ne plus nécessiter le rajustement des flux.

La possibilité de faire face à des « surprises » climatiques, comme une abrupte réorganisation des courants océaniques lorsque certains seuils critiques sont franchis, est l'un des principaux problèmes liés à la projection des futurs changements climatiques. Le rajustement des flux est tout particulièrement crucial à la simulation de tels phénomènes, puisqu'il révèle les erreurs figurant dans les processus qui servent en partie à établir où les seuils critiques se trouvent et qu'il a une incidence sur la mesure dans laquelle le climat actuel est stable ou instable. Cependant, ce n'est pas parce que les scientifiques sont incapables de prédire avec précision les changements climatiques abrupts qu'il faut laisser de vastes changements climatiques se produire, ces derniers pouvant entraîner ces changements climatiques abrupts.

3.7 Quelles sont les principales incertitudes entourant le changement climatique?

La toute première incertitude¹⁴⁷ entoure la sensibilité du climat, laquelle pourrait entraîner un réchauffement moyen de la planète, pour un doublement des concentrations de dioxyde de carbone, d'aussi peu que de 1 °C et allant jusqu'à 5 °C. L'ampleur de la sensibilité du climat est liée à l'incertitude entourant l'effet de refroidissement actuel des aérosols. Si cet effet de refroidissement est relativement important (neutralisant, par exemple, la moitié du réchauffement mondial moyen attribuable aux gaz à effet de serre), l'effet calorifique net est alors relativement faible, et une sensibilité du climat de 4 à 5 °C est permise, étant donné qu'avec un effet calorifique net réduit, le réchauffement simulé au cours du dernier siècle par les modèles climatiques est comparable au réchauffement observé. Par contre, si l'effet de refroidissement des aérosols est minime, l'effet calorifique net est important, et la sensibilité du climat doit se situer dans la partie inférieure de l'échelle de 1 à 5 °C, et ce, pour que le réchauffement simulé ne soit pas supérieur au réchauffement observé au cours du dernier siècle.

Deuxièmement, certaines incertitudes entourent les changements dans les températures et les précipitations dans les régions. Au sein de l'Amérique du Nord, l'étendue du réchauffement estival va d'aussi peu que de 2 ou 3 °C jusqu'à plus de 8 °C. Ce réchauffement est accompagné par un accroissement des précipitations dans certaines régions du continent et par une diminution des précipitations à d'autres endroits, dont dans certaines régions où le réchauffement est le plus marqué.

Troisièmement, certaines incertitudes entourent l'incidence des changements climatiques projetés. Les modèles décrivant l'incidence du changement climatique sur les forêts, par exemple, comportent un

certain nombre de faiblesses pouvant les inciter à surestimer les répercussions initiales d'un réchauffement, bien qu'en fin de compte, cela ne permette simplement (une fois ces erreurs possibles rectifiées) que de retarder un effondrement inévitable. D'autres incertitudes entourent l'importance du réchauffement nécessaire pour provoquer la fonte irréversible de la calotte de glace du Groenland et la déstabilisation de la calotte de glace de l'Antarctique occidentale. Ainsi, un réchauffement mondial moyen d'aussi peu que 2 °C pourrait suffire, mais il se pourrait qu'il doive être plus prononcé. D'autres incertitudes entourent l'importance du réchauffement nécessaire pour entraîner le dépérissement massif des récifs de corail à l'échelle mondiale. Ainsi, un réchauffement d'aussi peu que 1 °C pourrait suffire. En outre, il existe certaines incertitudes en ce qui concerne la mesure dans laquelle on pourrait adapter les techniques agricoles pour atténuer les répercussions négatives du changement climatique et en ce qui concerne les avantages que présente la fertilisation au dioxyde de carbone. Enfin, certaines incertitudes entourent les rétroactions possibles entre le climat et le cycle du carbone. Ainsi, le réchauffement initial de la planète pourrait libérer d'importantes quantités de dioxyde de carbone dans l'atmosphère en raison du dépérissement des forêts et de la libération du carbone contenu dans le sol, intensifiant par le fait même le réchauffement de la planète et le flux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Cette incertitude est reliée à l'incertitude concernant le rôle actuel de la biosphère terrestre en tant que puits de carbone, et donc à l'incidence que doivent avoir les concentrations accrues de dioxyde de carbone sur la productivité des écosystèmes pour correspondre au taux observé d'augmentation des concentrations de dioxyde de carbone. Bien qu'une telle incidence positive n'aboutisse pas à un effet de serre « précipité », elle pourrait néanmoins aboutir à une augmentation significative des émissions anthropiques et naturelles de dioxyde de carbone pendant un siècle ou plus.

Importance des incertitudes

Malgré les incertitudes susmentionnées, il n'en demeure pas moins que les émissions de dioxyde de carbone à l'échelon mondial doivent être réduites rapidement et vigoureusement. Ces incertitudes visent plutôt l'ampleur des dommages qui devraient survenir (à mesure que le climat « s'adapte » aux gaz à effet de serre qui se sont déjà accumulés) et les dommages additionnels attribuables aux futures augmentations des concentrations de ces gaz.

L'incertitude est parfois citée comme une raison pour retarder la prise de mesures visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre, ce qui est contraire aux principes de la gestion des risques. En effet, l'incertitude est un couteau à deux tranchants, celle-ci pouvant atténuer ou aggraver une estimation, et le fait de tenir adéquatement compte de l'incidence d'une incertitude *accroît* plutôt que diminue la nécessité de prendre des mesures préventives, surtout lorsque les répercussions prévues sont irréversibles. En d'autres termes, il faut porter attention au changement climatique, non pas *en dépit des* incertitudes, mais *à cause des* incertitudes.

Bibliographie

- ¹ Prentice, I.C. et al. « The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 187.
- ² Prentice, I.C. et al. « The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 203.
- ³ Prather, M. et al. « Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases », *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 244.
- ⁴ Prather, M. et al. « Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases », *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 244.
- ⁵ Prather, M. et al. « Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases », *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 261.
- ⁶ Levy II, H. et al. « The global impact of human activity on tropospheric ozone », *Geophysical Research Letters*, 24 (7), (1^{er} avril 1997), p. 791-794.
- ⁷ Prather, M. et al. « Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases », *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 241.
- ⁸ Folland, C.K. et al. « Observed Climate Variability and Change. » Dans Houghton, J.T. et al, éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 101.
- ⁹ Albritton, D.L. et al. *Summary for Policymakers: A Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 2.
- ¹⁰ Committee on the Science of Climate Change; Division on Earth and Life Studies; National Research Council. *Climate Change Science: An Analysis of Some Key Questions*, Washington, D.C., National Academy Press, 2001.
- ¹¹ Grossman, D. « Dissent in the Maelstrom; Maverick meteorologist Richard S. Lindzen keeps right on arguing that human-induced global warming isn't a problem », *Scientific American* [en ligne], (16 nov. 2001). Disponible en ligne à : http://www.sciam.com/print_version.cfm?articleID=00095B0D-C331-1C6E-84A9809EC588EF21.
- ¹² Singer, S.F. « Human Contribution to Climate Change Remains Questionable », *EOS, Transactions*, American Geophysical Society, vol. 80, (20 avril 1999), p. 183-187.
- ¹³ Lomborg, B. « The Skeptical Environmentalist Replies », *Scientific American*, (mai 2002), p. 14-15.
- ¹⁴ Panel on Reconciling Temperature Observations; Climate Research Committee; Board on Atmospheric Sciences and Climate; Commission on Geosciences, Environment and Resources; National Research Council. *Reconciling Observations of Global Temperature Change*, Washington, D.C., National Academy Press, 2000, p. 9.
- ¹⁵ Peterson, T.C. et R.S. Vose. « An Overview of the Global Historical Climatology Network Temperature Database », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 78, 1997, p. 2837-2849.

-
- ¹⁶ Peterson, T.C. et R.S. Vose. « An Overview of the Global Historical Climatology Network Temperature Database », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 78, 1997, p. 2837-2849.
- ¹⁷ Peterson, T.C. et R.S. Vose. « An Overview of the Global Historical Climatology Network Temperature Database », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 78, 1997, p. 2837-2849.
- ¹⁸ Folland, C.K. et al. « Observed Climate Variability and Change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 112.
- ¹⁹ Panel on Reconciling Temperature Observations; Climate Research Committee; Board on Atmospheric Sciences and Climate; Commission on Geosciences, Environment and Resources; National Research Council. *Reconciling Observations of Global Temperature Change*, Washington, D.C., National Academy Press, 2000, p. 32.
- ²⁰ Folland, C.K. et al. « Observed Climate Variability and Change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 101.
- ²¹ Gray, V. *The Greenhouse Delusion: A Critique of Climate Change 2001*, Multi-Science Publishing Co., 2001. Disponible en ligne à : <http://www.multi-science.co.uk>.
- ²² Panel on Reconciling Temperature Observations; Climate Research Committee; Board on Atmospheric Sciences and Climate; Commission on Geosciences, Environment and Resources; National Research Council. *Reconciling Observations of Global Temperature Change*, Washington, D.C., National Academy Press, 2000, p. 37.
- ²³ Gray, V. *The Cause of Global Warming*, Frontier Centre for Public Policy, Policy Series n° 7 (janv. 2001), ISSN 1491-7874.
- ²⁴ Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 1992, 198 p.
- ²⁵ Folland, C.K. et al. « Observed Climate Variability and Change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 105-106.
- ²⁶ Mann, M.E. et R.S. Bradley. « Northern Hemisphere Temperatures During the Past Millennium: Inferences, Uncertainties, and Limitations », *Geophysical Research Letters*, vol. 26, n° 6, (15 mars 1999), p. 759-762.
- ²⁷ Mann, M.E. et al. « Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries », *Nature*, vol. 392, (avril 1998), p. 779-787.
- ²⁸ Folland, C.K. et al. « Observed Climate Variability and Change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 105-106.
- ²⁹ Mann, M.E. « Climate during the past millennium », *Weather*, vol. 56, (mars 2001), p. 91-101.
- ³⁰ Harvey, L.D.D. *Global Warming: The Hard Science*, Harlow, Prentice Hall, 2000, p. 208. Voir aussi Hegerl, G.C. et J.M. Wallace. « Influence of Patterns of Climate Variability on the Difference between Satellite and Surface Temperature Trends », *Journal of Climate*, vol. 15, n° 17, 2002 (résumé). Voir aussi Singer, S.F. « Human Contribution to Climate Change Remains Questionable », *EOS, Transactions, American Geophysical Society*, vol. 80, (20 avril 1999), p. 183-187.

-
- ³¹ Christy, J.A. et al. « Observed Climate Variability and Change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 102, p. 133.
- ³² Panel on Reconciling Temperature Observations; Climate Research Committee; Board on Atmospheric Sciences and Climate; Commission on Geosciences, Environment and Resources; National Research Council. *Reconciling Observations of Global Temperature Change*, Washington, D.C., National Academy Press, 2000, p. 2.
- ³³ Panel on Reconciling Temperature Observations; Climate Research Committee; Board on Atmospheric Sciences and Climate; Commission on Geosciences, Environment and Resources; National Research Council. *Reconciling Observations of Global Temperature Change*, Washington, D.C., National Academy Press, 2000, p. 10.
- ³⁴ Panel on Reconciling Temperature Observations; Climate Research Committee; Board on Atmospheric Sciences and Climate; Commission on Geosciences, Environment and Resources; National Research Council. *Reconciling Observations of Global Temperature Change*, Washington, D.C., National Academy Press, 2000, p. 2.
- ³⁵ Committee on the Science of Climate Change; Division on Earth and Life Studies; National Research Council. *Climate Change Science: An Analysis of Some Key Questions*, Washington, D.C., National Academy Press, 2001. Voir aussi Mahlman, J.D. *Global Warming: Misuse of Data and Ignorance of Science; A review of the "global warming chapter of Bjorn Lomborg's The Skeptical Environmentalist: Measuring the Real State of the World*, Union of Concerned Scientists, 6 déc. 2001.
- ³⁶ Harvey, L.D.D. *Global Warming: The Hard Science*, Harlow, Prentice Hall, 2000, p. 74, p. 284, p. 288-89.
- ³⁷ Mann, M.E. « Climate during the past millennium », *Weather*, vol. 56, (mars 2001), p. 95.
- ³⁸ Lomborg, B. *The Skeptical Environmentalist: Measuring the Real State of the World*, Cambridge University Press, 2001, p. 262.
- ³⁹ Folland, C.K. et al. « Observed Climate Variability and Change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 133.
- ⁴⁰ Church, J.A. et al. « Changes in Sea Level. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 647.
- ⁴¹ Kuhn, M. et al. « Measurements and models of the mass balance of Hintereisferner », *Geographic Annaler*, 81A, 1999, p. 659-670.
- ⁴² Qin, D. et al. « Evidence for recent climate change from ice cores in the central Himalaya », *Annals of Glaciology*, vol. 31, 2000, p. 153-158. Rott, H. et al. « Mass fluxes and dynamics of Moreno Glacier, Southern Patagonian Icefield », *Geographic Research Letters*, vol. 25, 1998, p. 1407-1410. Voir aussi Kaser, G. « A Review of modern fluctuations of tropical glaciers », *Global and Planetary Change*, vol. 22, 1999, p. 93-104.
- ⁴³ Church, J.A. et al. « Changes in Sea Level. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 648.
- ⁴⁴ Christy, J.R. et al. « Observed Climate Variability and Change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 129.

-
- ⁴⁵ Lamont, G.N. et al. « Slopes of glacier ELAs in the Southern Alps of New Zealand in relation to atmospheric circulation patterns », *Global and Planetary Change*, vol. 22, p. 209-219. Voir aussi Tvede, A.M. et T. Laumann. « Glacial variations on a meso-scale example from glaciers in the Aurland Mountains, southern Norway », *Annals of Glaciology*, vol. 24, p. 130-134. Voir aussi Folland, C.K. et al. « Observed Climate Variability and Change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 129 et 153.
- ⁴⁶ Folland, C.K. et al. « Observed Climate Variability and Change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 123.
- ⁴⁷ Folland, C.K. et al. « Observed Climate Variability and Change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 124.
- ⁴⁸ Magnuson, J.J. et al. « Historical trends in lake and river ice cover in the Northern Hemisphere », *Science*, 2000, p. 1743-1746.
- ⁴⁹ Stocker, T.F. et al. « Physical Climate Processes and Feedbacks. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 446.
- ⁵⁰ Folland, C.K. et al. « Observed Climate Variability and Change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 127.
- ⁵¹ Myeni, R.B. et al. « Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981-1991 », *Nature*, vol. 386, 1997, p. 698-702.
- ⁵² « Ecosystems and Their Goods and Services. » Dans McCarthy, J.J. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, section 5.2.1.
- ⁵³ Church, J.A. et al. « Changes in Sea Level. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 643.
- ⁵⁴ Fleming, K. et al. « Refining the eustatic sea level curve since the Last Glacial Maximum using far- and intermediate-field sites », *Earth Planetary Science Letters*, vol. 163, 1999, p. 327-342.
- ⁵⁵ Lambeck, K. et E. Bard. « Sea level change along the French Mediterranean coast since the time of the Last Glacial Maximum », *Earth Planetary Science Letters*, vol. 175, 2000, p. 203-222.
- ⁵⁶ Church, J.A. et al. « Changes in Sea Level. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 663.
- ⁵⁷ Church, J.A. et al. « Changes in Sea Level. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 663.
- ⁵⁸ Cazene, A. et al. « Global mean sea level changes observed by Topex-Poseidon and ERS-1 », *Physical Chemical Earth*, vol. 23, p. 1069-1075. Voir aussi Nerem, R.S. et al. « Improved determination of global mean sea level

variations using TOPEX/POSEIDIN altimeter data », *Geophysical Research Letters*, vol. 24, p. 1331-1334. Voir aussi Nerem, R.S. « Measuring very low frequency sea level variations using satellite altimeter data », *Global and Planetary Change*, vol. 20, p. 157-171.

⁵⁹ Church, J.A. et al. « Changes in Sea Level. Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 664.

⁶⁰ Elkman, M. « The world's longest continued series of sea level rise », *Global and Planetary Change*, vol. 21, 1999, p. 215-244. Voir aussi Woodworth, P.L. « High waters at Liverpool since 1768: the UK's longest sea level record », *Geophysical Research Letters*, vol. 26, 1999, p. 1589-1592. Voir aussi Kearney, M.S. « Sea level change during the last thousand years in Chesapeake Bay », *Journal of Coastal Research*, vol. 12, 1996, p. 977-983. Voir aussi Maul, G.A. et D.M. Martin. « Sea level rise at Key West, Florida, 1846-1992: America's longest instrument record? », *Geophysical Research Letters*, vol. 20, 1993, p. 1955-1958.

⁶¹ Folland, C.K. et al. « Observed Climate Variability and Change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 164.

⁶² Prentice, I.C. et al. « The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 187, 204.

⁶³ Committee on the Science of Climate Change, Division on Earth and Life Studies, National Research Council. *Climate Change Science: An analysis of some key questions*, Washington D.C., National Academy Press, 2001, p. 2.

⁶⁴ Prentice, I.C. et al. « The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 187.

⁶⁵ Prentice, I.C. et al. « The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 187. Voir aussi Committee on the Science of Climate Change, Division on Earth and Life Studies, National Research Council. *Climate Change Science: An analysis of some key questions*, Washington D.C., National Academy Press, 2001, p. 10.

⁶⁶ Prentice, I.C. et al. « The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 187.

⁶⁷ Prather, M. et al. « Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 244.

⁶⁸ Prather, M. et al. « Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 243.

⁶⁹ Prentice, I.C. et al., éditeurs. « The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 204.

-
- ⁷⁰ Prather, M. et al. « Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 246.
- ⁷¹ Ramaswamy, V. et al. « Radiative Forcing of Climate Change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 392, figure 6.6.
- ⁷² Ramaswamy, V. et al. « Radiative Forcing of Climate Change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 358.
- ⁷³ Ramaswamy, V. et al. « Radiative Forcing of Climate Change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 358.
- ⁷⁴ Ramaswamy, V. et al. « Radiative Forcing of Climate Change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 358.
- ⁷⁵ Ramaswamy, V. et al. « Radiative Forcing of Climate Change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 393.
- ⁷⁶ Ramaswamy, V. et al. « Radiative Forcing of Climate Change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 352.
- ⁷⁷ Ramaswamy, V. et al. « Radiative Forcing of Climate Change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 358.
- ⁷⁸ Ramaswamy, V. et al. « Radiative Forcing of Climate Change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 394.
- ⁷⁹ Mitchell, J.F.B. et al. « Detection of Climate Change and Attribution of Causes. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 698-699.
- ⁸⁰ Mitchell, J.F.B. et al. « Detection of Climate Change and Attribution of Causes. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 699.
- ⁸¹ Committee on the Science of Climate Change; Division on Earth and Life Studies; National Research Council. *Climate Change Science: An Analysis of Some Key Questions*, Washington, D.C., National Academy Press, 2001, p. 3.
- ⁸² Committee on the Science of Climate Change; Division on Earth and Life Studies; National Research Council. *Climate Change Science: An Analysis of Some Key Questions*, Washington, D.C., National Academy Press, 2001, p. 17.
- ⁸³ Mitchell, J.F.B. et al. « Detection of Climate Change and Attribution of Causes. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contributions of Working Group I to the Third Assessment*

Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 710, figure 12.7.

⁸⁴ Willson, R.C. « Total solar irradiance trend during solar cycles 21 and 22 », *Science*, vol. 277, (26 septembre 1997), p. 1963-1965.

⁸⁵ Svensmark, H. et E. Friis-Christensen. « Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationships », *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 59 (11), 1997, p. 1225.

⁸⁶ Ramaswamy, V. et al. « Radiative Forcing of Climate Change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 393.

⁸⁷ Albritton, D.L. et al. *Summary for Policymakers: A Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 9.

⁸⁸ Lassen, K. et E. Friis-Christensen. « Variability of the solar cycle length during the past five centuries and the apparent association with terrestrial climate », *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, vol. 57, 1995, p. 835-845.

⁸⁹ Laut, P. et J. Gundermann. « Solar cycle length hypothesis appears to support the IPCC on global warming », *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, vol. 60, 1998, p. 1719-1728.

⁹⁰ Lomborg, B. *The Skeptical Environmentalist: Measuring the Real State of the World*, Cambridge University Press, 2001, p 278.

⁹¹ Laut, P. et P. Gundermann. « Solar cycle length hypothesis appears to support the IPCC assumptions on global warming: earlier analyses are shown to be misleading and to contain serious errors. Background for and commentary on new scientific article by Peter Laut and Jesper Gunderman. » Disponible en ligne à <http://www.dea-cat.dk/sun/JASTP2.htm>.

⁹² Svensmark, H. et E. Friis-Christensen. « Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationships », *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 59 (11), 1997, p. 1229.

⁹³ Ramaswamy, V. et al. « Radiative Forcing of Climate Change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 385.

⁹⁴ Committee on the Science of Climate Change, Division on Earth and Life Studies, National Research Council. *Climate Change Science: An analysis of some key questions*, Washington D.C., National Academy Press, 2001, p. 14.

⁹⁵ Levitus, S. et al. « Warming of the world ocean », *Science*, vol. 287, (24 mars 2000), p. 2225-2229.

⁹⁶ Kvenvolden, K.A. « Potential effects of gas hydrate on human welfare », *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, vol. 96, (mars 1999), p. 3420-3426.

⁹⁷ Prather, M. et al. « Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 250.

⁹⁸ Prather, M. et al. « Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases. » *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 250.

-
- ⁹⁹ Folland, C.K. et al. « Observed Climate Variability and Change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 101.
- ¹⁰⁰ Singer, S.F. « Human Contribution to Climate Change Remains Questionable », EOS, *Transactions*, American Geophysical Society, vol. 80, (20 avril 1999), p. 183-187.
- ¹⁰¹ Committee on the Science of Climate Change; Division on Earth and Life Studies; National Research Council. *Climate Change Science: An Analysis of Some Key Questions*, Washington, D.C., National Academy Press, 2001, p. 16.
- ¹⁰² Singer, S.F. « Human Contribution to Climate Change Remains Questionable », EOS, *Transactions*, American Geophysical Society, vol. 80, (20 avril 1999), p. 183-187.
- ¹⁰³ Mitchell, J.F.B. et al. « Detection of Climate Change and Attribution of Causes. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 699.
- ¹⁰⁴ Committee on the Science of Climate Change; Division on Earth and Life Studies; National Research Council. *Climate Change Science: An Analysis of Some Key Questions*, Washington, D.C., National Academy Press, 2001, p. 17.
- ¹⁰⁵ Berner, R.A. « The rise of plants and their effect on weathering and atmospheric CO₂ », *Science*, vol. 276, (25 avril 1997), p. 544-546.
- ¹⁰⁶ Prentice, I.C. et al. « The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 202.
- ¹⁰⁷ Fischer, H. et al. « Ice core records of atmospheric CO₂ around the last three glacial terminations », *Science*, 12 mars 1999, p. 1712-1714.
- ¹⁰⁸ Petit, J.R. et al. « Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok Ice Core, Antarctica », *Nature*, vol. 399, 1999, p. 429-436.
- ¹⁰⁹ Folland, C.K. et al. « Observed Climate Variability and Change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 137.
- ¹¹⁰ Veizer, J. et al. « Evidence for decoupling of atmospheric CO₂ and global climate during the Phanerozoic eon », *Nature*, vol. 408, (7 décembre 2000), p. 698-701.
- ¹¹¹ Pearson, P.N. et al. « Warm tropical sea surface temperatures in the Late Cretaceous and Eocene epochs », *Nature*, vol. 413, (4 octobre 2001), p. 481-486.
- ¹¹² Church, J.A. et al. « Changes in Sea Level. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 641.
- ¹¹³ Church, J.A. et al. « Changes in Sea Level. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 643.

-
- ¹¹⁴ Church, J.A. et al. « Changes in Sea Level. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 641.
- ¹¹⁵ Church, J.A. et al. « Changes in Sea Level. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 649.
- ¹¹⁶ Church, J.A. et al. « Changes in Sea Level. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 650.
- ¹¹⁷ Church, J.A. et al. « Changes in Sea Level. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 653.
- ¹¹⁸ Kabril, W. et al. « Rapid thinning of parts of the southern Greenland Ice Sheet », *Science*, vol. 289, 1999, p. 428-430. Voir aussi Davis, C.H. et al. « Elevation change of the southern Greenland Ice Sheet », *Science*, vol. 279, 1998, p. 2086-2088.
- ¹¹⁹ Doake, C.S.M. et al. « Breakup and conditions for stability of the northern Larsen Ice Shelf, Antarctica », *Nature*, vol. 391, 1998, p. 778-780.
- ¹²⁰ Whillans, I.M. et R.A. Bindshadler. « Mass balance of ice stream B, West Antarctica », *Annals of Glaciology*, vol. 11, 1988, p. 187-193. Voir aussi Hamilton, G.S. et al. « First point measurements of ice-sheet thickness change in Antarctica », *Annals of Glaciology*, vol. 27, 1998, p. 125-129. Voir aussi Rignot, E.J. « Fast recession of a West Antarctic glacier », *Science*, vol. 281, 1998, p. 549-551.
- ¹²¹ Bentley, C.R. et J. Wahr. « Satellite gravimetry and the mass balance of the Antarctic ice sheet », *Journal of Glaciology*, vol. 44, 1998, p. 207-213. Voir aussi Oppenheimer, M. « Global warming and the stability of the West Antarctic ice sheet », *Nature*, vol. 393, 1998, p. 325-331.
- ¹²² Church, J.A. et al. « Changes in Sea Level. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 679.
- ¹²³ Church, J.A. et al. « Changes in Sea Level. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 653.
- ¹²⁴ Church, J.A. et al. « Changes in Sea Level. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 653.
- ¹²⁵ Church, J.A. et al. « Changes in Sea Level. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 661.
- ¹²⁶ Church, J.A. et al. « Changes in Sea Level. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 665.
- ¹²⁷ Church, J.A. et al. « Changes in Sea Level. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 657.

-
- ¹²⁸ Gornitz, V. et al. « Effects of anthropogenic intervention in the land hydrological cycle on global sea level rise », *Global and Planetary Change*, vol. 14, 1997, p. 147-161. Voir aussi Sahagian, D. « Global physical effects of anthropogenic hydrological alterations: sea level and water redistribution », *Global and Planetary Change*, vol. 25, 2000, p. 39-48.
- ¹²⁹ Church, J.A. et al. « Changes in Sea Level. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 666.
- ¹³⁰ Church, J.A. et al. « Changes in Sea Level. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 666.
- ¹³¹ Cubasch, U. et al. « Projections of future climate change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 525-582.
- ¹³² Folland, C.K. et al. « Observed climate variability and change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, p. 139.
- ¹³³ Nakicenovic, N. et al. *IPCC Special Report on Emissions Scenarios*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, et New York, NY, É.-U., 2000.
- ¹³⁴ Prentice, I.C. et al. « The Carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, tableau 3.1.
- ¹³⁵ Harvey, L.D.D. *Global Warming: The Hard Science*, Harlow, Prentice Hall, 2000, section 8.9. Voir aussi Prentice, I.C. et al. « The Carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, tableau 3.4.
- ¹³⁶ Harvey, L.D.D. *Global Warming: The Hard Science*, Harlow, Prentice Hall, 2000, section 8.2. Voir aussi Prentice, I.C. et al. « The Carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, section 3.7.1.
- ¹³⁷ Harvey, L.D.D. *Global Warming: The Hard Science*, Harlow, Prentice Hall, 2000, section 8.6.
- ¹³⁸ Cubasch, U. et al. « Projections of future climate change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, figure 9.13.
- ¹³⁹ Harvey, L.D.D. et al. *An Introduction to Simple Climate Models used in the IPCC Second Assessment Report*, Intergovernmental Panel on Climate Change, document technique n° 2, 1997.
- ¹⁴⁰ Cubasch, U. et al. « Projections of future climate change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, tableau 9.1. Voir aussi Harvey, L.D.D. *Global Warming: The Hard Science*, Harlow, Prentice Hall, 2000, tableau 9.6.

¹⁴¹ Harvey, L.D.D. et R.K. Kaufmann. « Simultaneously constraining climate sensitivity and aerosol radiative forcing », *Journal of Climate*, vol. 15, 2002, p. 2837-2861.

¹⁴² Hoffert, M.I. et C. Covey. « Deriving global climate sensitivity from paleoclimatic reconstructions », *Nature*, vol. 360, 1992, p. 573-576.

¹⁴³ Prentice, I.C. et al. « The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, section 3.7.

¹⁴⁴ Cubasch, U. et al. « Projections of future climate change. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001, tableau 9.1. Voir aussi Harvey, L.D.D. *Global Warming: The Hard Science*, Harlow, Prentice Hall, 2000, chapitre 10. Voir aussi Giorgi, F. et al. « Regional climate information – evaluation and projections. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 2001.

¹⁴⁵ Harvey, L.D.D. *Global Warming: The Hard Science*, Harlow, Prentice Hall, 2000, figure 8.1.

¹⁴⁶ Prentice, I.C. et al. « The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. » Dans Houghton, J.T. et al., éditeurs. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2001, p. 185.

¹⁴⁷ Adapté de Harvey, L.D.D. « Climatic Change: Addressing complexity, uncertainty, and conflict. » Dans Mitchell, B. (ed.) *Resource and Environmental Management in Canada: Addressing Conflict and Uncertainty, 3rd Edition*, Oxford University Press (sous presse).