

SOMMAIRE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

**Projections du climat
futur du Canada**

**CCD 00-01
Édition spéciale**



Projections du climat futur du Canada

Discussion de simulations récemment effectuées
avec le modèle canadien du climat du globe

préparé par

Henry G. Hengeveld

Service météorologique du Canada
Environnement Canada

Le présent document s'inscrit dans le rapport sur l'état de l'environnement



Ce papier contient un minimum de 50% de fibres recyclées
dont 10% de fibres recyclées après consommation.

INTRODUCTION ET REMERCIEMENTS

Projections du climat futur du Canada a été rédigé pour fournir au milieu de la recherche sur les impacts du climat, aux décideurs et au grand public du Canada un résumé des résultats d'expériences récentes de changement climatique menées avec la première version du modèle canadien couplé du climat, décrire comment ils ont été obtenus, et discuter tant leur crédibilité que leurs limites. Ce document est le troisième d'une série d'éditions « spéciales » des Sommaires du changement climatique, qui visent à expliquer et à évaluer notre compréhension actuelle (ou les lacunes à cet égard) de certains des aspects les plus complexes et les plus controversés de la science du changement climatique.

Il a été rédigé par Henry Hengeveld, conseiller scientifique principal sur le changement climatique, de la Direction de l'évaluation et de l'intégration scientifiques, Service météorologique du Canada (SMC), et révisé par David Francis, de Lanark House Communications (Toronto).

L'auteur tient à remercier de leur précieux apport (fourniture de données, révision et/ou critiques) les personnes suivantes, du SMC et de l'extérieur : George Boer, Greg Flato, Steve Lambert et Francis Zwiers (Centre canadien de modélisation et d'analyse du climat -Victoria); Doug Whelpdale (Directeur, Direction de la recherche climatologique -Downsview); Rob Cross et John Stone (Politiques et affaires ministérielles -Ottawa); Daniel Caya (Université du Québec à Montréal). Patti Edwards (SAIB) a aussi fourni une contribution appréciée en préparant nombre des graphiques et en y mettant la dernière main, et en faisant la lecture d'épreuve du texte final.

La version française de ce rapport a été traduite par Marie-France Guéraud, du Bureau de la traduction, Travaux publics et Services gouvernementaux (Montréal), et révisée par Guy Fenech (SAIB). La mise en page, les illustrations et la production technique ont été réalisées par BTT Communications (Toronto).

Ce rapport est disponible sous forme électronique sur le site Web de SAIB, à l'adresse www.tor.ec.gc.ca/apac/.

On peut aussi se procurer des copies papier supplémentaires gratuites en en faisant la demande écrite à :

**Direction de l'évaluation et de l'intégration scientifique
Direction générale des sciences atmosphériques et climatiques
Service météorologique du Canada
4905, rue Dufferin
Downsview (Ontario)
M3H 5T4**

(416) 739-4432

Publié avec l'autorisation du ministre de l'Environnement

**© Ministère des Travaux publics et Services gouvernementaux
Canada 2000**

TABLE DES MATIÈRES

LE SYSTÈME CLIMATIQUE ET LES MODÈLES DU CLIMATM	1
LE MODÈLE COUPLÉ CANADIEN	3
ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DU MCCGI	5
COMPARAISONS DE MODÈLES	5
SIMULATIONS DE L'HISTOIRE RÉCENTE DU CLIMAT	7
PROJECTIONS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE FUTUR EFFECTUÉES À L'AIDE DU MCCGI	10
RÉSULTATS DES PROJECTIONS DU CLIMAT	11
PROJECTION DES TENDANCES D'ICI 2100	11
TENDANCES EN AMÉRIQUE DU NORD ET DANS LES RÉGIONS AVOISINANTES	15
PHÉNOMÈNES EXTRÊMES	19
ORIENTATIONS FUTURES	23
CONCLUSION	26
ENCADRÉS	
DÉMARRAGE DU MODÈLE COUPLÉ DU CLIMAT	4
CAUSES POSSIBLES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE RÉCENT	8
COMPARAISONS AVEC LES PROJECTIONS D'AUTRES MODÈLES DU CLIMAT	14
MODÈLES DES CLIMATS RÉGIONAUX	25

LE SYSTÈME CLIMATIQUE ET LES MODÈLES DU CLIMAT

Grâce à la phénoménale croissance de la puissance informatique survenue depuis une vingtaine d'années, les chercheurs des sciences tant physiques que sociales ont pu recourir de plus en plus à la modélisation mathématique pour explorer des phénomènes complexes. Les modèles mathématiques lient les diverses équations qui décrivent les relations et processus clés en jeu dans un système pour simuler le comportement de celui-ci. En modifiant la valeur de certaines variables, les scientifiques peuvent étudier comment le système répond à des changements, qu'ils soient internes ou externes. Comme les processus du système ne peuvent jamais être parfaitement compris, les modèles doivent nécessairement simplifier la réalité. Leurs résultats doivent donc être utilisés avec prudence. Néanmoins, dans de nombreux domaines, ils ont atteint un tel degré de fiabilité qu'on les utilise de façon courante à des fins opérationnelles ou de recherche. À l'heure actuelle, les modèles mathématiques sont régulièrement utilisés à des fins très diverses : analyser le comportement du marché, préparer des **p r é v i s i o n s** météorologiques, et tester des armes nucléaires. Dans le domaine de la recherche, ils sont très utiles pour analyser des phénomènes difficiles à étudier en laboratoire ou sur le terrain.

Ces modèles prennent une importance particulière dans les recherches sur le changement climatique. En fait, le degré de compréhension que nous avons actuellement du système climatique et de sa réponse probable à l'augmentation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre n'a pu être atteint que grâce à l'existence de ce que l'on appelle les modèles de circulation générale, ou modèles du climat du globe – de puissants programmes informatiques qui simulent le système climatique planétaire en trois dimensions et dans le temps. Si l'on considère l'expertise scientifique nécessaire pour monter ces modèles et les énormes ressources informatiques consom-

mées pour les faire tourner, il n'est pas surprenant que seulement quelques pays soient présentement engagés dans une modélisation sophistiquée du climat.

Le Canada est l'un d'eux, avec une présence active dans le domaine de la modélisation du climat qui remonte aux années 1970. Ces travaux, qui exigent une étroite collaboration entre des scientifiques d'Environnement Canada et les universités, se font maintenant au Centre canadien de modélisation et d'analyse du climat (CCmaC), situé à Victoria, en Colombie-Britannique. Au fil des ans, les modélisateurs canadiens du climat ont apporté d'importantes contributions à notre compréhension des processus en jeu et du changement climatique. À l'aube d'un nouveau siècle, au cours duquel le changement

climatique pourrait devenir l'un des plus grands problèmes de l'humanité, leurs travaux deviennent encore plus importants, car c'est sur eux que reposeront la sensibilisation du public et la prise de décisions. Le présent rapport examine les récentes activités de recherche menées au CCmaC, et les conclusions qu'on peut en tirer quant à l'évolution probable du changement climatique pendant le prochain siècle. On y trouvera une

description du premier modèle couplé du climat du CCmaC et de ses capacités, une revue des résultats et des implications des récentes expériences sur le changement climatique, et une discussion de la fiabilité de ces résultats. En outre, on comparera les résultats des expériences du CCmaC avec ceux d'autres groupes de modélisation. Enfin, le rapport examinera rapidement les développements actuels et futurs des recherches canadiennes par modélisation du climat.

Les préoccupations actuelles quant au changement climatique tiennent à deux faits clairs et incontestés. Le premier est que les gaz à effet de serre, comme le dioxyde de carbone et le méthane, ralentissent la vitesse à laquelle la Terre renvoie de la chaleur vers l'espace, et donc

**Les chercheurs des sciences
tant physiques que sociales ont
pu recourir de plus en plus à la
modélisation mathématique
pour explorer des
phénomènes complexes.**

contribuent au réchauffement de son atmosphère. Le second est que les concentrations de ces gaz augmentent en conséquence des activités humaines.

Cette augmentation, qui est déjà très considérable et qui va se poursuivre tant que les émissions de gaz à effet de serre ne seront pas réduites de façon draconienne, devrait conduire à un réchauffement de la surface et de la basse atmosphère de la planète. Nous ne pouvons cependant pas dire avec certitude de quel ordre sera ce réchauffement, non plus que nous ne pouvons déterminer dans l'immédiat quels autres aspects du climat seront touchés, parce que le système climatique de la Terre est d'une effrayante complexité. En effet, il n'est pas seulement régi par les processus en jeu dans l'atmosphère proprement dite; il fait aussi intervenir des interactions entre les océans, les surfaces des terres, les organismes vivants, et les masses de glace polaires. Une modification significative d'un de ces éléments peut entraîner des changements importants des autres. Ceux-ci peuvent à leur tour déclencher diverses rétroactions, qui induisent de nouvelles modifications du premier changement; dans certains cas, il s'agira d'une compensation ou d'une atténuation, dans d'autres d'un renforcement.

Pour déterminer l'effet probable d'un changement tel que l'accroissement des concentrations de gaz à effet de serre sur le changement climatique, il faut examiner la réponse du système dans son ensemble. Les modèles du climat sont essentiels pour y parvenir, parce qu'ils intègrent les principaux processus qui interviennent dans le système climatique, et calculent les ajustements et rajustements des divers éléments en réponse au changement original.

Les premiers modèles qui pouvaient le faire ont vu le jour vers la fin des années 1970. Ils simulaient le comportement de l'atmosphère terrestre en trois dimensions, représentant le fonctionnement des processus climatiques non seulement à la surface de la Terre, mais aussi à divers niveaux en altitude. Cependant, la puissance informatique disponible à l'époque étant limitée, leur simulation du système climatique manquait nécessairement de raffinement. Les océans, qui jouent un rôle majeur dans le transport de chaleur d'une partie du globe à l'autre, étaient représentés de façon très simplifiée, et leurs interactions avec l'atmosphère seulement de manière très générale. Les nuages, dont les effets sur le réchauffement de l'atmosphère varient avec la structure, l'altitude et la fraction de ciel couverte (ainsi qu'avec le moment de la journée), étaient aussi mal représentés et ne pouvaient pas réagir aux changements d'autres conditions atmosphériques. La représentation du cycle hydrologique, qui a d'importantes implications pour les nuages, les précipitations, l'humidité

du sol, et le réchauffement par effet de serre, était tout aussi sommaire. De plus, les premiers modèles n'avaient qu'une résolution très grossière. En fait, ils ne pouvaient représenter les variations des paramètres du climat simulé qu'à des échelles d'environ 800 km ou plus. C'est donc avec une précision très limitée qu'étaient reproduits un grand nombre de processus climatiques.

Vers la fin des années 1980, cependant, les progrès des techniques de modélisation, de la compréhension des processus climatiques et de la puissance des ordinateurs ont permis d'élaborer une deuxième génération de MCG. La représentation des océans y était encore très simplifiée, mais les interactions entre la couche d'eau superficielle et l'atmosphère étaient beaucoup mieux rendues. En plus, la résolution spatiale avait été améliorée, la description du cycle hydrologique était plus détaillée, et la glace de mer et les nuages répondaient aux changements du climat du modèle. Les chercheurs ont alors pu explorer ce qu'ils appelaient le changement climatique à l'équilibre, autrement dit les nouvelles conditions climatiques qui régneraient une fois que le système se serait stabilisé en réponse à un changement donné des concentrations de gaz à effet de serre – en général un doublement. Les modèles ont donné des indications précieuses sur la sensibilité du système climatique à une hausse des concentrations de gaz à effet de serre, mais ils ne pouvaient toujours pas simuler de façon satisfaisante ce qu'on appelle le climat aux états transitoires, c'est-à-dire le comportement du système climatique pendant qu'il est en train de changer plutôt qu'une fois qu'il a fini de changer. La capacité de modéliser les états transitoires est essentielle, parce qu'elle fournit une meilleure approximation de l'évolution que nous voyons dans le climat d'une année et d'une décennie à l'autre, et permet donc de tester de façon plus rigoureuse jusqu'à quel point le modèle réussit à simuler le comportement historique du système réel.

Pour simuler le climat aux états transitoires, les modèles devaient offrir une bien meilleure représentation des processus océaniques, et donc disposer d'encore plus de puissance informatique. À la fin des années 1980 et au début des années 1990, divers groupes de modélisation commençaient à avoir cette capacité, et une troisième génération de modèles du climat, beaucoup plus sophistiqués, a vu le jour. Connus sous le nom de modèles couplés de la circulation générale de l'atmosphère et de l'océan, ou plus simplement de modèles couplés du climat, ils consistent en un MCG atmosphérique pleinement couplé à un modèle tridimensionnel détaillé de l'océan. Cette caractéristique, combinée à d'autres raffinements, leur confère la capacité de modéliser le climat de façon beaucoup plus réaliste.

À l'heure actuelle, il y a dans le monde plus de 20 modèles de ce genre en utilisation ou en développement. Le Centre canadien de modélisation et d'analyse du climat a terminé la construction de son premier modèle couplé, le MCCGI, au milieu des années 1990 et l'a utilisé depuis pour une série d'expériences de changement climatique aux états transitoires, dont les résultats ont été mis à la disposition du centre de distribution de données du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

(GIEC) pour qu'ils puissent être utilisés dans les recherches sur les impacts du changement climatique. En 1999, la National Academy of Science des États-Unis a aussi identifié le MCCGI comme l'un des modèles donnant actuellement les meilleures performances dans la simulation du changement climatique et recommandé que ses résultats soient utilisés dans l'évaluation nationale du changement climatique effectuée par son pays.

LE MODÈLE COUPLÉ CANADIEN

Le MCCGI est une bonne illustration à la fois des caractéristiques évoluées et des limites persistantes des modèles du climat les plus avancés à la fin du vingtième siècle. Il a quatre composantes clés :

1. Un *modèle de la circulation générale de l'atmosphère*, le MCGII, à 10 niveaux verticaux et une résolution horizontale d'environ 3,7° de latitude et de longitude (à peu près 400 km). Cette résolution se compare à celle utilisée dans la plupart des MCG atmosphériques, bien que certains arrivent maintenant à des résolutions inférieures à 300 km. Les caractéristiques des nuages et de la nébulosité répondent interactivement aux autres changements du système climatique.
2. Un *modèle de la circulation générale de l'océan* capable de reproduire les caractéristiques à grande échelle de la circulation océanique, ainsi que d'importantes propriétés de l'eau, comme la température et la salinité. Connue sous le nom de module océanique modulaire (MOM), il a été développé par le Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, à Princeton, New Jersey, et modifié pour être utilisé dans le MCCGI. Il a 29 niveaux verticaux et une résolution horizontale d'environ 200 km. Cette résolution, bien que deux fois plus fine que celle du modèle de l'atmosphère, est encore inadéquate pour bien décrire tous les nombreux processus qui régissent le comportement des océans.
3. Un *modèle thermodynamique de la glace de mer*, qui reproduit la croissance et la fonte de la glace en réponse aux échanges de chaleurs avec l'océan et l'atmosphère. Les ouvertures dans la couverture glacielle sont représentées par une relation avec la quantité de glace présente. Ce modèle des glaces avait aussi été utilisé dans les précédentes simulations à l'équilibre faites avec le MCG de deuxième génération du CCmaC.
4. Un *modèle de la surface des terres* simple, qui calcule le ruissellement et l'humidité du sol à partir de l'équilibre entre les précipitations, l'évaporation en surface,

et la capacité de rétention d'eau du sol. Ce dernier paramètre varie avec l'endroit, ainsi que selon le type de sol et ses propriétés. Bien que la végétation ne soit pas incluse directement dans le modèle, certains de ses effets sont approximés en spécifiant différentes profondeurs de sol et taux d'évapotranspiration aux divers endroits.

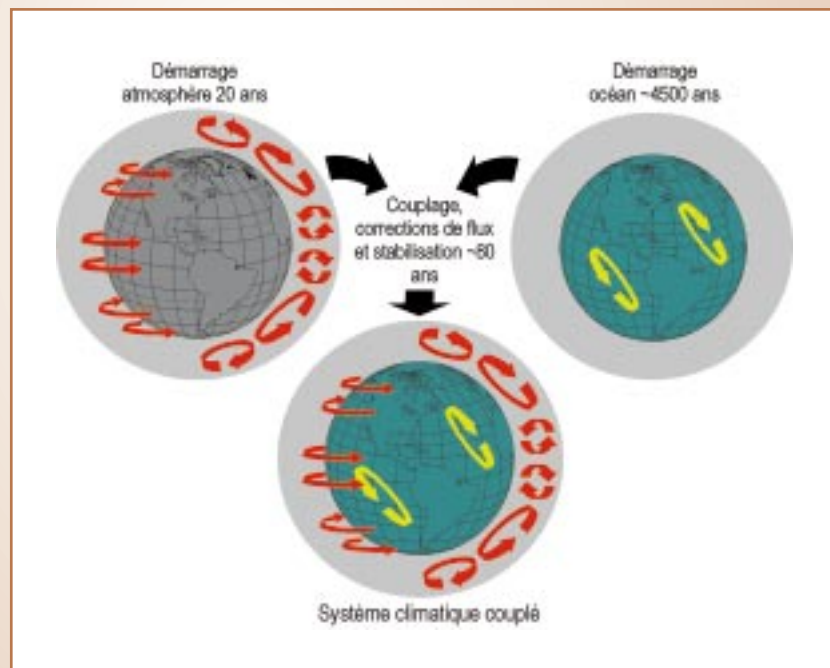
Pour utiliser le modèle, on doit d'abord démarrer séparément les composantes atmosphérique et océanique jusqu'à un état d'équilibre équivalent au climat présent, et les coupler de manière que l'atmosphère et l'océan interagissent sur une base quotidienne. Cependant, des erreurs dans le transfert modélisé de la chaleur et de l'humidité entre l'océan et l'atmosphère peuvent faire dériver le modèle avec le temps et induire des résultats irréalistes. On pense que ces erreurs sont liées à des omissions et inexactitudes dans certaines des approximations des processus océaniques et atmosphériques entrées dans le modèle.

Les groupes de modélisation ont adopté deux solutions différentes pour régler ce problème de dérive. Certains postulent que la dérive restera la même pendant toute la durée de l'expérience de changement climatique, et peut donc être soustraite des résultats une fois le taux de dérive déterminé dans les simulations du climat actuel. La plupart de groupes, dont le CCmaC, cependant, ont tenté d'éliminer la dérive en apportant des ajustements aux flux de chaleur et d'eau douce entre l'océan et l'atmosphère. Ces corrections de flux, comme on les appelle, sont alors utilisées dans toutes les expériences effectuées avec le modèle. Les deux méthodes ont certes leurs avantages et inconvénients, mais les chercheurs ne peuvent pas écarter la possibilité que l'une comme l'autre introduisent des erreurs imprévues dans les résultats expérimentaux. Les chercheurs du CCmaC et d'ailleurs ont accordé une grande priorité à la réduction et à l'élimination à terme de ce besoin de corrections de flux dans les modèles futurs.

Démarrage du modèle couplé du climat

Les modèles de circulation générale simulent le système climatique en utilisant des équations mathématiques pour décrire le bilan radiatif de la Terre, la manière dont il se traduit en chaleur et en mouvement, et le fonctionnement du cycle hydrologique. Cependant, avant de pouvoir être utilisés dans les études du climat, ils doivent être « démarrés » pour atteindre un certain état d'équilibre dans le système climatique simulé. Pour l'atmosphère, ce « démarrage » peut être réalisé sur quelques heures de temps simulé. Par contre, les océans, qui réagissent beaucoup plus lentement, exigent plusieurs milliers d'années de démarrage pour atteindre un état d'équilibre approximatif.

Pour ne pas gaspiller de précieux temps de calcul, les composantes atmosphériques et océaniques d'un modèle couplé sont généralement démarrées séparément avant d'être assemblées, bien qu'il faille encore programmer certaines interactions de base entre l'atmosphère et les océans dans chaque composante pendant le démarrage. Dans le cas du MCGI, la composante atmosphérique est d'abord couplée à un système océanique en couche mélangée sans circulation, avec des températures de surface de la mer approximativement égales aux valeurs observées; on la fait ensuite tourner jusqu'à ce qu'on approche l'équilibre. Le modèle atmosphérique tourne ensuite sur 20 ans de plus, de manière que les chercheurs puissent calculer le flux moyen d'énergie et d'eau douce entre l'atmosphère et la surface de l'océan, et estimer les vents en surface sur l'océan. Cette information est alors utilisée pour démarrer le modèle océanique, qui tourne sur une période simulée de plus de 4500 ans, pour atteindre un équilibre proche des conditions réelles observées. À ce point, les deux composantes sont couplées. Cependant, les deux démarrages étant séparés, il persiste de grandes différences entre les estimations des quantités de chaleur et d'humidité échangées entre l'océan et l'atmosphère faites par les deux composantes. Si ces flux ne sont pas équilibrés, il peut s'ensuivre avec le temps une grande dérive du climat simulé. C'est pourquoi on applique au système couplé un ajustement des flux basé au départ sur les écarts entre ces valeurs.



Les deux composantes du modèle peuvent alors

interagir pleinement et s'adapter l'une à l'autre pour une période de simulation d'une dizaine d'année. D'autres ajustements sont alors apportés pour minimiser la dérive qui pourrait persister dans le système couplé. Celui-ci tourne encore sur 70 ans pour permettre aux irrégularités initiales du système de s'estomper. Une fois stabilisé, on fait tourner le modèle dans ce mode de « contrôle » sur une période de simulation pouvant atteindre 1000 ans, pour obtenir une sortie statistique utile dans l'étude de la variabilité naturelle du climat du modèle. Cette information sert aussi à évaluer la capacité du modèle à approximer le système climatique réel, et aussi comme référence de comparaison pour les résultats d'expériences de changement climatique menées avec le modèle.

ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DU MCCGI

Cette nécessité d'apporter des corrections de flux nous rappelle que les modèles sont des approximations simplifiées d'une réalité très complexe, et que leurs résultats doivent être interprétés avec prudence. C'est pourquoi les groupes de modélisation consacrent beaucoup d'efforts à évaluer la fiabilité de leurs modèles. Ces évaluations non seulement permettent de déterminer dans quels domaines la performance du modèle est acceptable et dans lesquels elle est faible, mais aussi aident les chercheurs à interpréter les résultats des expériences et à raffiner les composantes du modèle.

Il y a diverses façons d'évaluer la performance d'un modèle. Un des tests de base concerne sa capacité à reproduire les principales caractéristiques du climat actuel. Les autres grandes vérifications portent sur sa capacité à simuler les changements climatiques du passé et sa performance par rapport à d'autres modèles du climat.

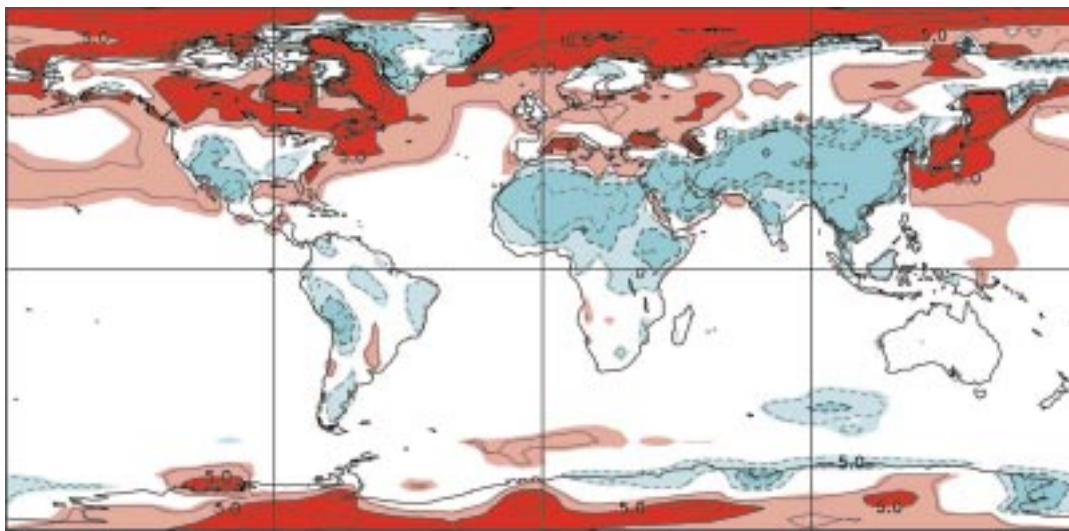
Comparaisons de modèles

On procède à des comparaisons des sorties des modèles avec le climat observé et avec les résultats d'autres modèles dans le cadre du Programme mondial de recherches sur le climat, essentiellement par le biais du Projet de comparaison des modèles de l'atmosphère et plus récemment du Projet de comparaison des modèles couplés. Les résultats de ces comparaisons et d'autres études confirment que le MCCGI produit une description généralement réaliste des caractéristiques d'échelle planétaire du système climatique de la Terre. En particulier,

- le MCCGI est très stable, avec une très faible dérive de 0,15 °C par siècle (environ 10 fois moins que les changements de température que devrait causer dans les prochaines décennies l'impact des activités humaines sur le système climatique);

Figure 1

Écarts entre les températures de surface modélisées et observées

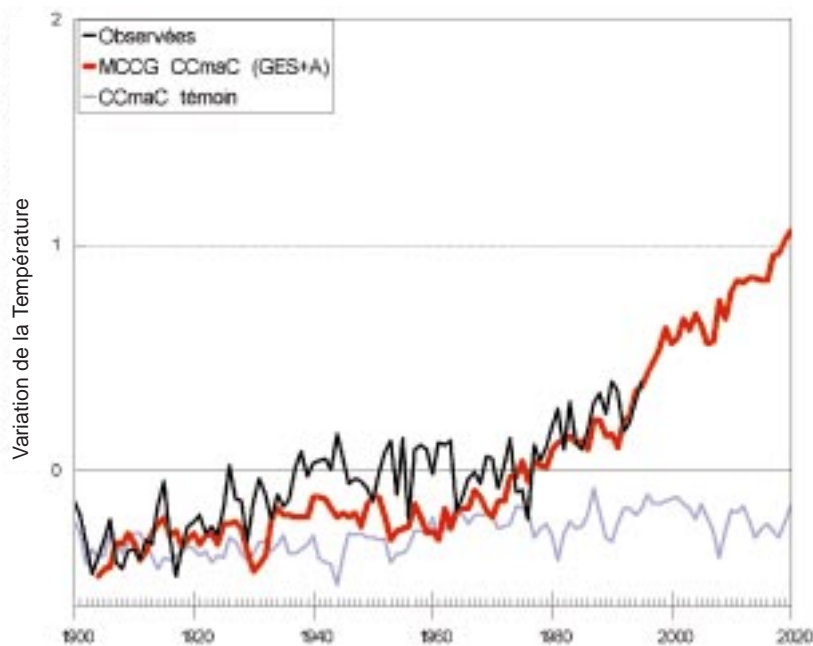


Source: Flato et al. (2000)

Différences entre les simulations par le MCCGI et les observations de la température en surface, montrées ici pour les mois de décembre, janvier et février. En général, les températures simulées concordent assez bien avec les conditions observées. Il y a cependant des écarts significatifs sur certaines zones des terres et sur l'océan Arctique.

- les températures planétaires moyennes, les régimes de la pression au niveau de la mer, et la circulation atmosphérique sont proches de celles observées dans la réalité. Il reproduit aussi des caractéristiques similaires à l'Oscillation australe (qui joue un rôle dans le phénomène El Niño), l'Oscillation nord-atlantique (liée à des changements périodiques des régimes météorologiques en Europe), et d'autres caractéristiques de la variabilité interne du climat. À cet égard, la performance du modèle le classe parmi les meilleurs des modèles couplés testés dans le cadre de programmes de comparaison. Cependant, comme le montre la figure 1, il présente des écarts notables entre sa simulation des températures régionales sur les terres en hiver et les conditions observées. C'est en terrain montagneux et sur l'océan Arctique que ces écarts sont les plus marqués. En outre, alors que le MCGI rend très bien la variabilité interannuelle des températures sur les terres, il la sous-estime sur certaines zones océaniques, comme le Pacifique tropical;
- les régimes planétaires des précipitations semblent aussi rendus de façon réaliste, mais ils sont plus difficiles à évaluer que ceux de la température et de la pression;
- les régimes de circulation, de salinité et de transport de chaleur dans l'océan se situent généralement dans la plage des estimations basées sur les observations. Dans les régions polaires, on constate certains écarts entre les régimes simulés et les régimes observés;
- l'extension de la glace de mer est raisonnablement bien approximée dans l'Antarctique, mais sous-estimée en été comme en hiver dans l'Arctique. La couverture nivale planétaire concorde bien avec les observations, surtout en hiver, mais elle est surestimée dans certaines régions (p. ex. le plateau de Mongolie) et sous-estimée dans d'autres (p. ex. l'ouest de l'Europe). Certains de ces écarts sont peut-être dus à la médiocrité des données d'observation plutôt qu'à des déficiences du modèle.

Figure 2
Tendances projetées et prévues de la température au XX^e siècle



Sources: Flato et al. (2000); NOAA

Tendances et variations des températures planétaires moyennes en surface simulées par la passe de contrôle du MCGI (ligne bleue) et par une des passes GES + aérosols (ligne rouge), comparées aux tendances observées du climat (ligne noire).

Simulations de L'Histoire Récente du Climat

On a aussi testé le MCCGI pour déterminer s'il peut simuler de manière réaliste les changements survenus dans le climat mondial au cours du dernier siècle. Pour ce faire, on a effectué une série d'expériences. La première était une passe de contrôle dans laquelle les concentrations de gaz à effet de serre et autres forces de changement externes étaient gardées constantes. On voulait ainsi obtenir un point de référence avec lequel comparer les résultats des autres expériences. Une deuxième expérience (GES) ne faisait intervenir que les augmentations des concentrations de gaz à effet de serre, converties en concentration équivalente de dioxyde de carbone. Enfin, un ensemble de trois expériences a examiné les effets des gaz à effet de serre et d'un autre facteur, les aérosols de sulfates. Ce sont de minuscules particules en suspension dans l'atmosphère qui, comme les gaz à effet de serre, sont essentiellement un sous-produit de la combustion de combustibles fossiles. À l'inverse des gaz à effet de serre, cependant, ils ont un effet refroidissant sur les températures en surface parce qu'ils renvoient vers l'espace le rayonnement solaire incident. Les aérosols sulfatés se distinguent aussi des gaz à effet de serre en ce qu'ils ont une durée de vie relativement courte. Ils sont donc concentrés en aval des régions où ils se sont formés (surtout l'est de l'Amérique du Nord et l'Eurasie), et leurs effets ont tendance à être plus localisés que ceux des gaz à effet de serre, dont le temps de résidence atmosphérique est beaucoup plus long et qui sont donc distribués plus également sur la planète.

Chacune des expériences faisant intervenir les gaz à effet de serre et les aérosols démarrait avec des conditions initiales légèrement différentes, de manière à introduire dans la simulation une approximation de la variabilité naturelle et du bruit au sein du système climatique. Les changements de la concentration et de la distribution des aérosols sulfatés étaient basés sur des estimations indépendantes effectuées par des spécialistes des aérosols à l'aide de modèles chimiques. Les scénarios tant de gaz à effet de serre que d'aérosols utilisés dans les expériences étaient semblables à ceux utilisés par d'autres groupes de modélisation.

Le modèle ne prenait pas en compte les effets indirects des aérosols sulfatés sur les propriétés des nuages, et donc sur le climat, parce que ceux-ci ne sont pas encore bien compris. De même, on avait laissé de côté les effets des variations d'intensité du rayonnement solaire, de l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, et des changements des concentrations des aérosols non sulfatés, même s'il est certain que ces facteurs ont eu une influence sur le climat au cours du dernier siècle (voir l'encadré

Causes possibles du changement climatique récent

Lorsque les expériences ont été faites, la simulation ne faisant intervenir que les gaz à effet de serre surestimait l'ampleur du changement des températures, avec une augmentation globale de 0,8 °C depuis 1900, un peu supérieure à ce qui a été observé. En outre, la répartition spatiale du réchauffement ne montrait pas non plus les zones de refroidissement en surface mises en évidence par les observations.

Les trois expériences intégrant à la fois les gaz à effet de serre et les aérosols ont par contre reproduit le climat du dernier siècle avec un assez bon réalisme. Comme le montre la figure 2, la hausse modélisée de 0,6 °C de la température moyenne de la planète concorde avec les meilleures estimations issues des enregistrements climatologiques, bien que le modèle ait tendance à sous-estimer les températures moyennes du milieu du XX^e siècle, peut-être en raison de la variabilité naturelle ou de changements de certains forçages du climat qui n'étaient pas pris en compte par le modèle.

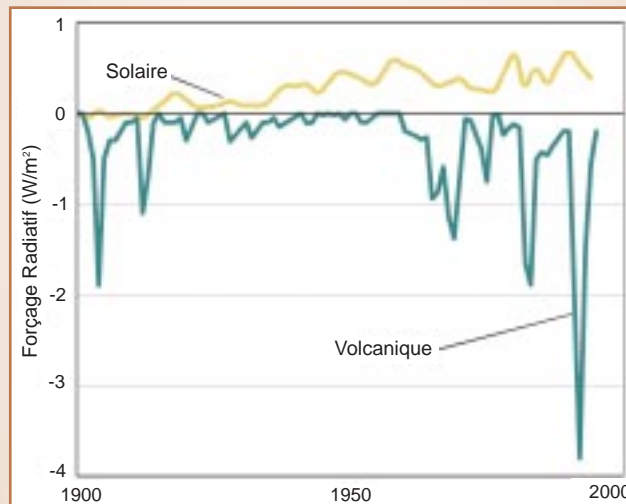
En outre, l'allure générale du changement climatique montré par les expériences du modèle était qualitativement semblable à ce qui a été observé. Le maximum de réchauffement dans le centre et le nord de l'hémisphère Nord se produisait en hiver, et des poches de refroidissement se formaient sur certaines parties des océans et, en été, sur des régions limitées des continents. Le maximum de réchauffement dans l'hémisphère Sud touchait les latitudes moyennes des océans. Les détails du changement diffèrent d'une expérience à l'autre, ce qui à la fois donne une indication concrète de la capacité du modèle à simuler la variabilité du climat naturel et montre comment ces fluctuations aléatoires peuvent rendre les effets des gaz à effet de serre et des aérosols plus difficiles à détecter.

Ces expériences ont donc permis de conclure que les processus internes du MCCGI donnent une bonne image de la réalité.

Causes possibles du changement climatique récent

Les scientifiques pensent que, au cours du dernier siècle, plusieurs processus externes au système climatique ont agi sur les tendances du climat de la planète. Ils sont illustrés par les figures ci-dessous.

- **Changements d'intensité du rayonnement solaire.** L'apport d'énergie du Soleil varie légèrement d'une décennie à l'autre, et l'on a aussi des indications que l'intensité du rayonnement solaire a augmenté quelque peu au cours des 3 derniers siècles. Les causes de ces fluctuations décennales et de la tendance à plus long terme ne sont pas encore bien comprises, et l'ampleur de ces changements est entachée de beaucoup d'incertitude, mais ils peuvent avoir des effets importants sur notre climat. Les meilleures estimations suggèrent que, au cours du dernier siècle, ils ont fait augmenter d'environ 0,2 watts par mètre carré la quantité d'énergie gagnant les bas niveaux de l'atmosphère. Certains experts avancent que la tendance à l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire peut se renverser au cours du prochain siècle.
- **Changements des concentrations d'aérosols stratosphériques.** Les éruptions volcaniques explosives, comme celle du mont Pinatubo en 1991, peuvent injecter de grandes quantités d'aérosols (c.-à-d. des particules liquides et solides) directement dans la stratosphère. Ces aérosols, qui sont surtout composés de sulfates, réfléchissent très efficacement le rayonnement solaire incident et, pendant les périodes de concentration maximale qui suivent l'éruption, entraînent un refroidissement net en surface qui peut atteindre 0,5 °C. Cet effet de refroidissement est cependant de relativement courte durée, puisque les aérosols décantent de l'atmosphère en trois à cinq ans, et il ne peut se maintenir que si plusieurs grosses éruptions explosives se succèdent en peu de temps. Entre 1920 et 1960, les concentrations d'aérosols sulfatés dans la stratosphère imputables à ce genre d'éruptions ont été inférieures à la moyenne, ce qui a laissé davantage de rayonnement solaire atteindre la surface de la Terre. Cette situation a pu contribuer à un certain réchauffement en surface au cours de la période, mais l'on pense que l'effet a été minime.



Changements estimatifs de l'apport net, en watts par mètre carré (W/m^2), d'énergie dans le système climatique au cours du dernier siècle dus à des facteurs naturels comme l'intensité du rayonnement solaire et les éruptions volcaniques.

Sources: Lean et al. (1995); Schimel et al. (1995)

- **Augmentations des concentrations de gaz à effet de serre.** Les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre de longue durée de vie, et donc bien mélangés, se sont accrues de façon substantielle dans toutes les régions du monde. Les concentrations de dioxyde de carbone, par exemple, ont monté de 30 % par rapport aux niveaux de l'époque pré-industrielle, celles de méthane de 145 % et celles d'hémioxyde d'azote de 15 %. Les concentrations d'autres gaz traces, dont certains proviennent uniquement des activités humaines, ont aussi connu une augmentation. Le forçage supplémentaire dû à ces gaz au cours du dernier siècle atteint environ 2,5 watts par mètre carré. Des augmentations supplémentaires des concentrations de ces gaz au cours du prochain siècle pourraient y ajouter 2 à 8 watts par mètre carré.
- **Augmentations des concentrations troposphériques d'aérosols.** Les concentrations de ces aérosols, qui incluent les aérosols sulfatés, la suie, la poussière minérale et les particules produites lors de la combustion de la biomasse, se sont considérablement accrues au cours du dernier siècle du fait des activités humaines. Comme ces substances restent relativement peu de temps dans l'atmosphère, leurs concentrations sont maximales à proximité des sources, baissent rapidement avec la distance à la source, et à mesure que les sources sont éliminées. La plus grande partie de la hausse des concentrations est

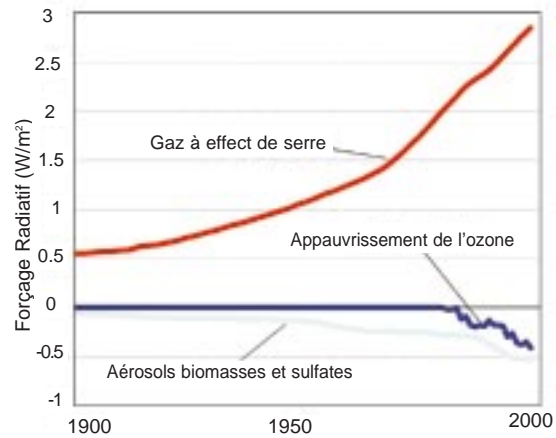
survenue dans les 50 dernières années, à proximité et en aval de régions industrialisées, et donc surtout dans l'hémisphère Nord. Les effets de ces substances sur le climat sont complexes et encore mal compris. On estime que les effets directs des accroissements passés des aérosols sulfatés (que l'on pense les plus abondants) par réflexion du rayonnement solaire incident ont fait baisser la quantité d'énergie solaire absorbée dans la basse atmosphère et à la surface, d'une valeur comprise entre 0 et 1,5 watt par mètre carré. Leurs effets indirects par modification des propriétés des nuages sont encore très difficiles à estimer, mais pourraient être encore plus élevés. Dans les prochaines décennies, cet effet de refroidissement devrait augmenter substantiellement avec l'accroissement des émissions dans les pays en développement, mais cette tendance pourrait être ralentie, voire renversée, si des mesures de limitation des émissions étaient mises en place dans ces pays.

• **Amincissement de la couche d'ozone.**

L'appauvrissement de la couche d'ozone

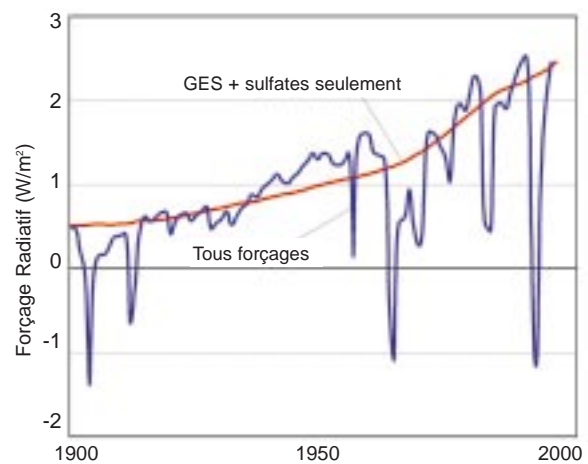
stratosphérique dans les 20 dernières années a aussi fait baisser la quantité nette d'énergie thermique conservée dans le système climatique d'une valeur estimée à 0,2 watts par mètre carré. Les études menées avec des modèles du climat et de la chimie de l'atmosphère suggèrent que l'appauvrissement de l'ozone continuera d'influer sur le climat pendant quelques dizaines d'années. Cet effet baissera graduellement si la couche d'ozone se rétablit comme prévu en réponse à l'élimination graduelle des substances destructrices d'ozone aux termes du Protocole de Montréal.

Chacune des forces de changement ci-dessus a son effet propre, dans le temps et dans l'espace, sur le système climatique. En effet, chacune évolue différemment, et a un effet particulier sur le flux de l'énergie dans le système climatique. Par exemple, les changements de l'intensité du rayonnement solaire et des concentrations de gaz à effet de serre ont un effet d'échelle planétaire, alors que ceux des concentrations des aérosols et de l'ozone stratosphérique sont de nature plus régionale. Il reste certes beaucoup à apprendre sur leurs diverses influences sur le climat, mais l'effet net de toutes ces forces semble en gros de même ampleur que l'influence combinée des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés.



Changements estimatifs de l'apport net d'énergie dans le système climatique au cours du dernier siècle dus à des facteurs anthropiques, dont les gaz à effet de serre bien mélangés (ligne rouge continue), l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique (ligne bleue foncée) et les aérosols sulfatés (ligne bleue légère).

Sources: Shine et al. (1990); Schimel et al. (1995); Hansen et al. (1997)



Comparaison du forçage radiatif net dû aux changements passés des concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols (ligne orange) utilisés dans les expériences avec le MCCI (ligne rouge) avec le forçage estimé lorsque l'on prend en compte d'autres facteurs de forçage comme le rayonnement solaire, l'appauvrissement de l'ozone et les aérosols non sulfatés.

Sources: Shine et al. (1990); Lean et al. (1995); Schimel et al. (1995); Hansen et al. (1997)

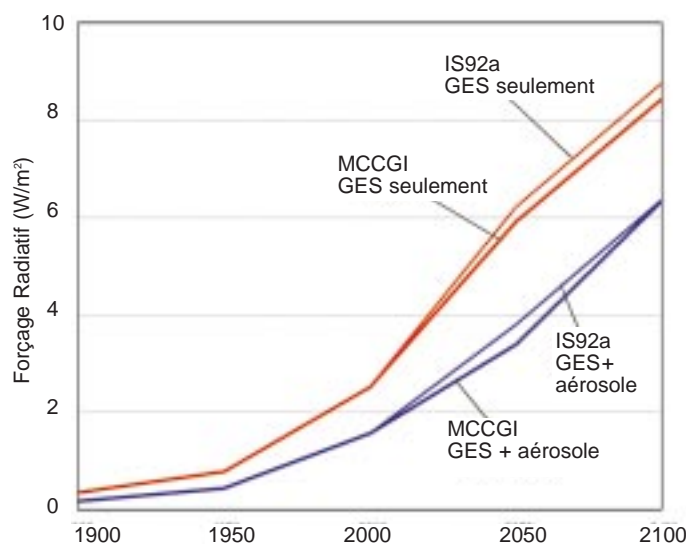
PROJECTIONS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE FUTUR EFFECTUÉES À L'AIDE DU MCCGI

Une fois la crédibilité d'un modèle établie au moyen de simulations réalistes de climats passés et présents et de comparaisons avec d'autres modèles, on peut l'utiliser avec une certaine confiance pour explorer le changement climatique à venir. Pour étudier le changement climatique au cours du XXI^e siècle, les modélisateurs du CCmaC ont poursuivi la passe de contrôle, la simulation « GES » et les trois expériences « GES + aérosols » au-delà de 1990 jusqu'à la fin de 2100. La passe de contrôle donnait une base pour évaluer la dérive du modèle et la variabilité naturelle, et un point de référence auquel on pourrait comparer les résultats des autres expériences. En poursuivant l'expérience historique (au lieu de les démarrer « à froid »), on démarrerait en marche (« à chaud ») les simulations du changement climatique au XXI^e siècle, ce qui permettait de faire en sorte que les changements climatiques qui avaient déjà commencé au XX^e siècle et qui évoluaient encore soient incorporés dans les scénarios du

changement climatique à venir. Cette méthode assurait aussi que les effets des différences originales dans les conditions initiales des expériences historiques se poursuivraient dans les expériences de la période 1990-2100 et donneraient une indication du degré de variabilité naturelle du climat dans les trois réponses aux changements des gaz à effet de serre et des aérosols.

À partir de 1990, les concentrations combinées de gaz à effet de serre utilisées dans les quatre expériences de changement climatique ont été accrues à raison de 1 % par an, ce qui revient à atteindre en 2050 un doublement des concentrations de dioxyde de carbone de 1980 (ou un triplement des concentrations de l'époque pré-industrielle). En 2100, les concentrations de gaz à effet de serre du modèle sont équivalentes au triple des concentrations de dioxyde de carbone de 1980 et au quadruple des valeurs pré-industrielles.

Figure 3
Comparaison de scénarios de forçage radiatif



Sources : GIEC (1992); GIEC (1995); Boer et al. (2000)

Comparaison du forçage planétaire moyen utilisé dans les quatre expériences de changement climatique du MCCGI avec celui estimé pour le scénario IS92a du GIEC utilisé par d'autres groupes de modélisation. La proximité des lignes montre qu'ils sont très semblables.

Bien que plusieurs autres groupes de modélisation aient aussi utilisé le scénario composé à 1 % pour les augmentations des gaz à effet de serre, certains ont pris un autre scénario, proposé en 1992 par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Appelé IS92a, ce scénario prévoit les augmentations des émissions de gaz à effet de serre du prochain siècle sur la base des estimations des changements de la demande en énergie, de la croissance démographique, et d'autres facteurs. Comme le montre la figure 3, l'énergie supplémentaire disponible au système climatique (ou « forçage planétaire moyen ») est très similaire dans les deux cas.

Dans les trois expériences « GES + aérosols », on postulait que les effets directs des aérosols sulfatés sur le système climatique pour la période 1990–2100 ne changeraient que peu dans les actuelles régions industrialisées de la planète. Cependant, on incluait des augmentations substantielles pour certaines régions en développement, surtout le Mexique, le Moyen-Orient, l'Asie du sud-est, et certaines régions d'Amérique du Sud

et d'Afrique. Dans ces régions, les concentrations d'aérosols culminent en 2050 et baissent légèrement par la suite.

Un certain nombre d'autres facteurs, comme les changements d'intensité du rayonnement solaire et l'aminçissement de la couche d'ozone, peuvent aussi influencer sur le déroulement futur du changement climatique. En raison des incertitudes quant à leurs impacts sur le climat, ces facteurs n'ont pas été inclus dans les expériences. Les chercheurs pensent que la contribution de ces facteurs au changement climatique à venir sera beaucoup moins importante que celle des gaz à effet de serre ou des aérosols sulfatés (voir l'encadré *Causes possibles du changement climatique récent*), mais leur omission dans les expériences risque d'avoir rendu un peu moins réaliste la représentation des changements interdécennaux du climat par le modèle.

RÉSULTATS DES PROJECTIONS DU CLIMAT

Les résultats des cinq expériences de changement climatique menées avec les MCGI décrites plus haut sont très instructifs quant à l'orientation, l'ampleur et les manifestations à grande échelle probables du changement climatique au cours du XXI^e siècle. Ils révèlent non seulement les changements projetés des températures et des précipitations moyennes de la planète, mais aussi les changements éventuels des régimes de circulation océanique, du niveau de la mer, de la glace de mer et des extrêmes climatiques, ainsi que les tendances possibles du comportement du climat au niveau régional, et à l'échelle saisonnière, voire quotidienne.

Avant d'examiner ces résultats en détail, il faut cependant se rappeler qu'ils ne sont qu'un élément d'un processus continu de raffinement des connaissances sur le changement climatique. Bien qu'ils fournissent des indications précieuses sur le climat futur, ils ne sont aucunement définitifs, mais doivent être interprétés à la lumière des connaissances sur les forces et limites du modèle, des résultats d'expériences semblables effectuées avec d'autres modèles, et de notre compréhension générale du système climatique. Ils sont un moyen de valider et de raffiner les évaluations et meilleures estimations actuelles du changement climatique, comme celles publiées par le

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, et aident à développer de nouvelles estimations basées sur de meilleures simulations. Celles-ci, à leur tour, seront plus tard modifiées à mesure que l'on disposera des résultats de nouvelles expériences faites avec des modèles encore plus sophistiqués.

Projection des tendances d'ici 2100

La discussion ci-dessous des projections du changement climatique au cours du prochain siècle effectuées avec le MCGI concerne, sauf indication contraire, les résultats des trois passes « GES + aérosols » (les plus réalistes des scénarios utilisés). Comme la variabilité interne du système climatique peut induire des fluctuations inter-annuelles considérables, les projections du modèles sont calculées en tant que changement entre les conditions moyennes sur une période donnée de 20 ans et celles d'une période de référence de même durée. Pour simplifier les choses, ces périodes sont désignées par leur année centrale. Ainsi, les projections pour « 2010 » visent en fait la période de 2000 à 2020, et ceux de « 2050 » la période de 2040 à 2060. De même, la période allant de 1975 à 1995 est désignée par « 1985 ».

Température. Les passes « GES + aérosols » montrent toutes les trois des tendances très semblables des températures planétaires moyennes en surface. Celles-ci dépassent les valeurs de 1985 d'environ 0,5 °C en 2010 et 1 °C en 2025. L'élévation passe à 1,7 °C en 2050, à environ 3 °C en 2075 et à près de 4,5 °C en 2100. Lorsque les effets de refroidissement des aérosols ne sont pas pris en compte, les augmentations sont encore plus marquées, la hausse des températures planétaires moyennes en surface de la simulation « GES seulement » atteignant 2,4 °C en 2050 et près de 5,5 °C à la fin du siècle. La passe de contrôle, par contre, montre des températures ne s'écartant des valeurs pré-industrielles que de quelques dixièmes de degrés.

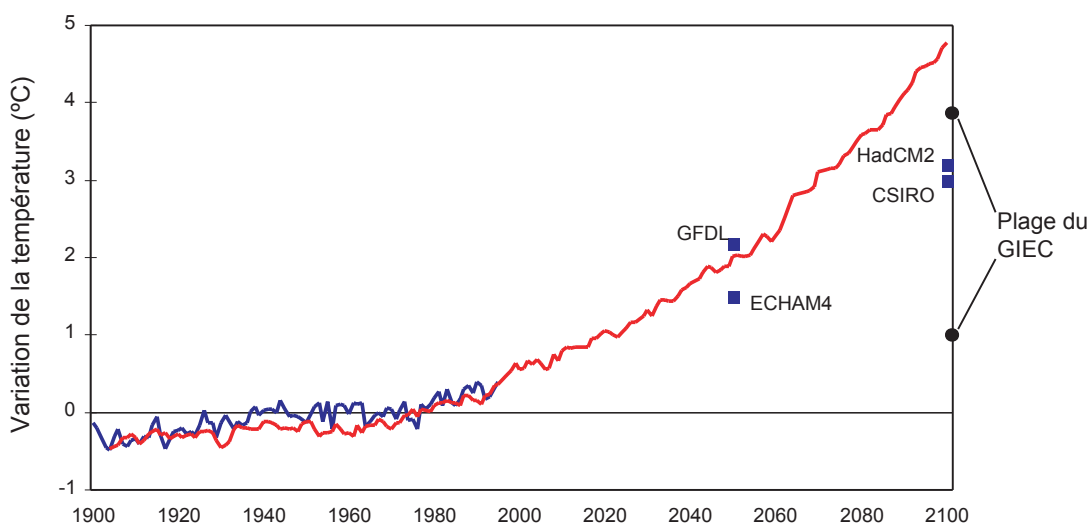
Si l'on regarde au-delà des moyennes planétaires, on peut s'attendre à ce que les températures montent plus vite sur les terres que sur les océans. Dans les trois expériences « GES + aérosols », l'élévation des températures en 2050 est en moyenne de 2,5 °C sur les terres, contre 1,5 °C sur les océans. En 2100, cependant, l'écart se creuse entre les élévations de température sur les terres et sur les océans, les terres s'étant réchauffées de 6 °C et les océans de 3,5 °C.

Lorsque le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat a terminé sa deuxième évaluation du changement climatique pour les Nations Unies, en 1995, il estimait que la plage probable d'élévation de la température moyenne à la surface de la Terre au cours du prochain siècle était de 1 °C à 3,5 °C, si l'on prenait en compte les effets à la fois des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés. Comme le montre la figure 4, les trois simulations « GES + aérosols » du MCCGI restent proches de la borne supérieure de ces estimations jusqu'aux environs de 2060, comme le font d'ailleurs des expériences similaires avec quatre autres modèles avancés. Par la suite, cependant, les projections des divers modèles commencent à diverger en raison de différences dans les caractéristiques des modèles. Le MCCGI indique en 2100 un réchauffement plus élevé que les estimations du GIEC et que les deux autres modèles dont les expériences vont jusqu'à cette date, mais les projections des trois modèles semblent toutes bien au-dessus du milieu de la plage projetée par le GIEC.

Si ces projections de modèles sont correctes, on peut s'attendre à ce que la température moyenne se rapproche

Figure 4

Changement projeté des températures planétaires en surface

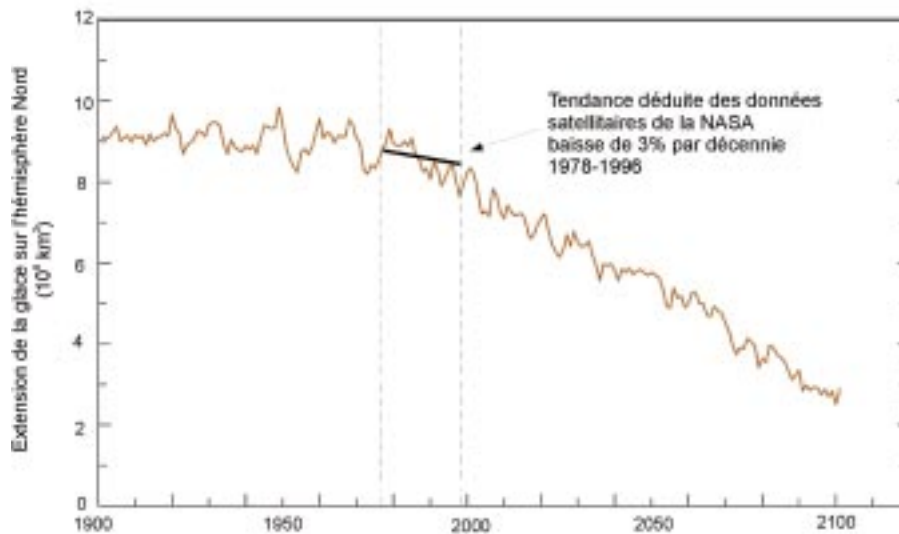


Sources : Boer et al. (2000); centre de distribution de données du GIEC

La simulation faite avec le MCCGI (ligne rouge) projette pour 2100 un réchauffement de plus de 4 °C par rapport aux valeurs de la période 1951–1980 (ligne bleue). On présente aussi, à des fins de comparaison, les résultats des autres expériences de modélisation pour 2050 et 2100 (carrés bleus), ainsi que les tendances observées et la plage de réchauffement projetée par le GIEC en 1995 (lignes noires).

Figure 5

Changement projeté de la couverture de glace de mer dans l'Arctique



Source: G. Flato

Le MCCGI projette que la couverture de glace de mer dans l'Arctique sera presque totalement disparue en 2100.

de niveaux qui n'ont pas été connus depuis la période interglaciaire qui a précédé notre dernière grande glaciation, il y a quelque 125 000 ans, et peut-être même les dépasse. La vitesse à laquelle ce changement surviendra sera elle aussi remarquable. Au cours de la transition entre le maximum de la dernière glaciation, il y a environ 25 000 ans, et le début du présent interglaciaire, il y a 10 000 ans, les températures globales ont monté de 4 à 8 °C sur plusieurs millénaires. Or, alors que les élévations projetées de la température au cours du prochain siècle sont sensiblement du même ordre de grandeur, elles se produiront sur une période extrêmement plus courte.

Précipitations. Lorsque la température s'élève, l'évaporation des eaux de surface augmente, et le cycle hydrologique s'accélère. Les précipitations planétaires moyennes devraient donc augmenter elles aussi. Les expériences du MCCGI projettent pour 2050 un accroissement d'environ 1 % avec les passes « GES + aérosols » et de plus de 2 % avec les passes « GES seulement ». Pour 2100, ces estimations montent à 4,5 % et 7 % respectivement. Les augmentations des précipitations surviennent principalement sur les océans (où l'humidité en surface est facilement disponible) et sur les terres aux latitudes plus élevées de l'hémisphère Nord. Ailleurs, les précipitations moyennes sur les terres ne changent pas

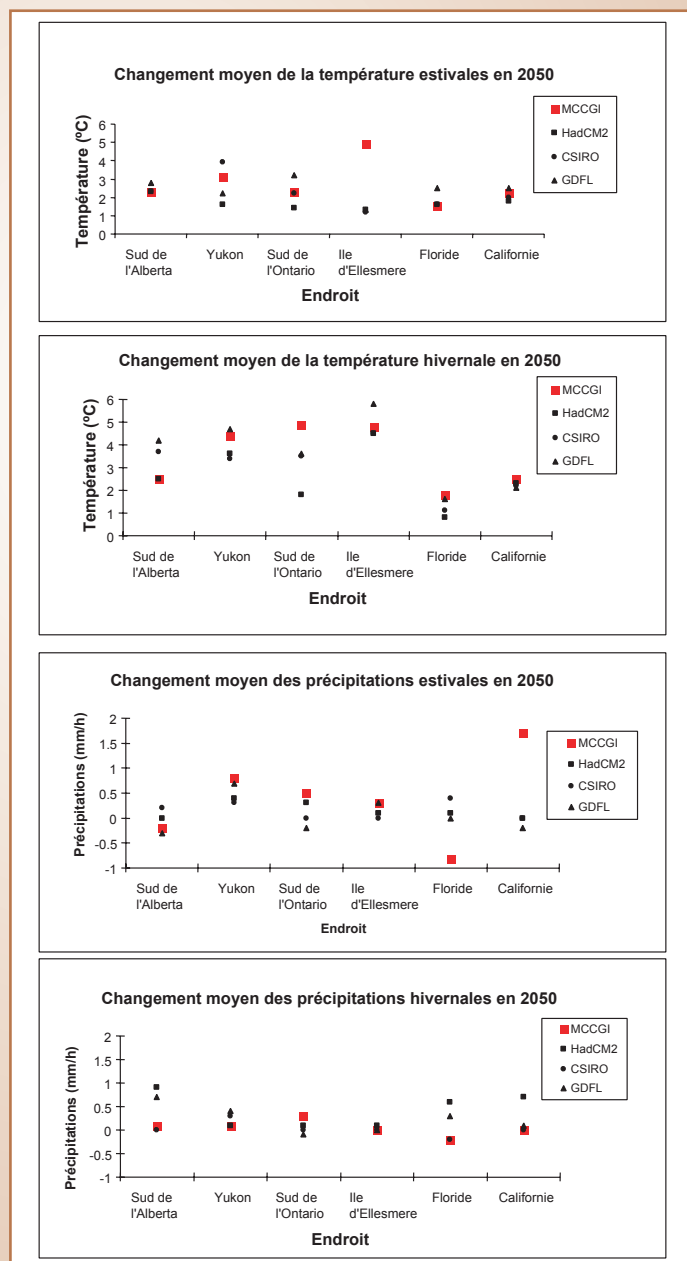
beaucoup, voire diminuent. En raison de la hausse des températures et de l'évaporation, il y a presque partout sur les terres une baisse de l'humidité moyenne du sol, surtout en été. Sur l'hémisphère Nord, le type des précipitations aussi sera modifié dans un climat plus chaud. La saison de neige sera significativement plus courte, et la superficie enneigée diminuera de plus de 30 % en hiver.

Glaces de mer. Selon les projections du MCCGI, la couverture de glace de mer dans l'hémisphère Nord subira d'importants changements, sa superficie annuelle moyenne étant réduite d'environ 40 % en 2050 et presque nulle en 2100 (Figure 5). Dans le Haut-Arctique, les eaux libres occuperont donc une superficie plus grande, et pendant plus longtemps, ce qui aura de grandes répercussions sur le climat de cette région, puisque l'eau libre permet le transfert de plus d'humidité vers l'atmosphère et absorbe davantage de rayonnement solaire incident. Cette situation, à son tour, entraîne une augmentation des précipitations sur la région, surtout en hiver, et du transfert de chaleur de l'océan à l'atmosphère. Les changements des conditions glacielles dans l'hémisphère Sud, par contraste, sont beaucoup moins prononcés, surtout parce que le réchauffement sera moindre sur les eaux entourant l'Antarctique.

Comparaisons avec Les Projections D'autres Modèles du Climat

Plusieurs autres modèles du climat ont été utilisés pour des expériences semblables à celle que nous avons décrite plus haut. Tous montrent un réchauffement significatif pendant le XXI^e siècle en réponse aux augmentations des concentrations des gaz à effet de serre et au changement des concentrations des aérosols, avec des hausses de température pour le siècle qui se situent dans la moitié supérieure, voire au-dessus de la plage de 1 à 3,5 °C estimée en 1995 par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Avec des scénarios de forçage similaires, les groupes de modélisation du Hadley Centre, au Royaume-Uni, du GFDL, aux États-Unis, du MPI, en Allemagne, et du CSIRO, en Australie, ont projeté des élévations de température comprises entre 1,4 et 2,2 °C pour la période 2040–2069, soit une moyenne de 1,8 °C pour l'ensemble des quatre modèles. Par comparaison, la projection du MCCGI pour la même période est d'environ 2 °C. Les autres modèles couplés, en général, montrent des caractéristiques d'échelle continentale comparables à celles du MCCGI, et des régimes similaires de réchauffement plus prononcé sur les terres que sur les océans.

Aux échelles régionale et locale, il se manifeste cependant quelques grandes différences, qui rappellent que l'on ne peut accorder qu'une confiance limitée aux détails des simulations des modèles à ces échelles. Les illustrations ci-dessous comparent avec celles de trois autres modèles les projections du MCCGI des changements de la température et des précipitations qui surviendront entre 2040 et 2060 dans six relativement petites régions d'Amérique du Nord : l'île d'Ellesmere, le nord du Yukon, le centre des Prairies, le sud de l'Ontario, la Floride, et le sud de la Californie. Toutes montrent un réchauffement notable, mais l'écart entre les résultats est aussi très marqué pour presque tous les endroits. Toutes indiquent également des changements relativement faibles des précipitations estivales pour les quatre sites canadiens, mais le MCCGI donne des changements plus prononcés pour les deux sites américains. De même, les 4 modèles prévoient une augmentation des précipitations aux deux sites de l'Arctique, mais ne concordent pas sur l'orientation du changement des précipitations en été dans le sud du Canada. Ils indiquent pour les six endroits que les précipitations hivernales ne changeront pas beaucoup ou augmenteront. Ces résultats nous rappellent que les résultats aux échelles régionale et locale doivent encore être pris avec prudence, surtout en ce qui concerne les précipitations. C'est pourquoi il est important de disposer des résultats d'un certain nombre de modèles avancés lorsqu'on évalue les implications sociales et écologiques du changement climatique.



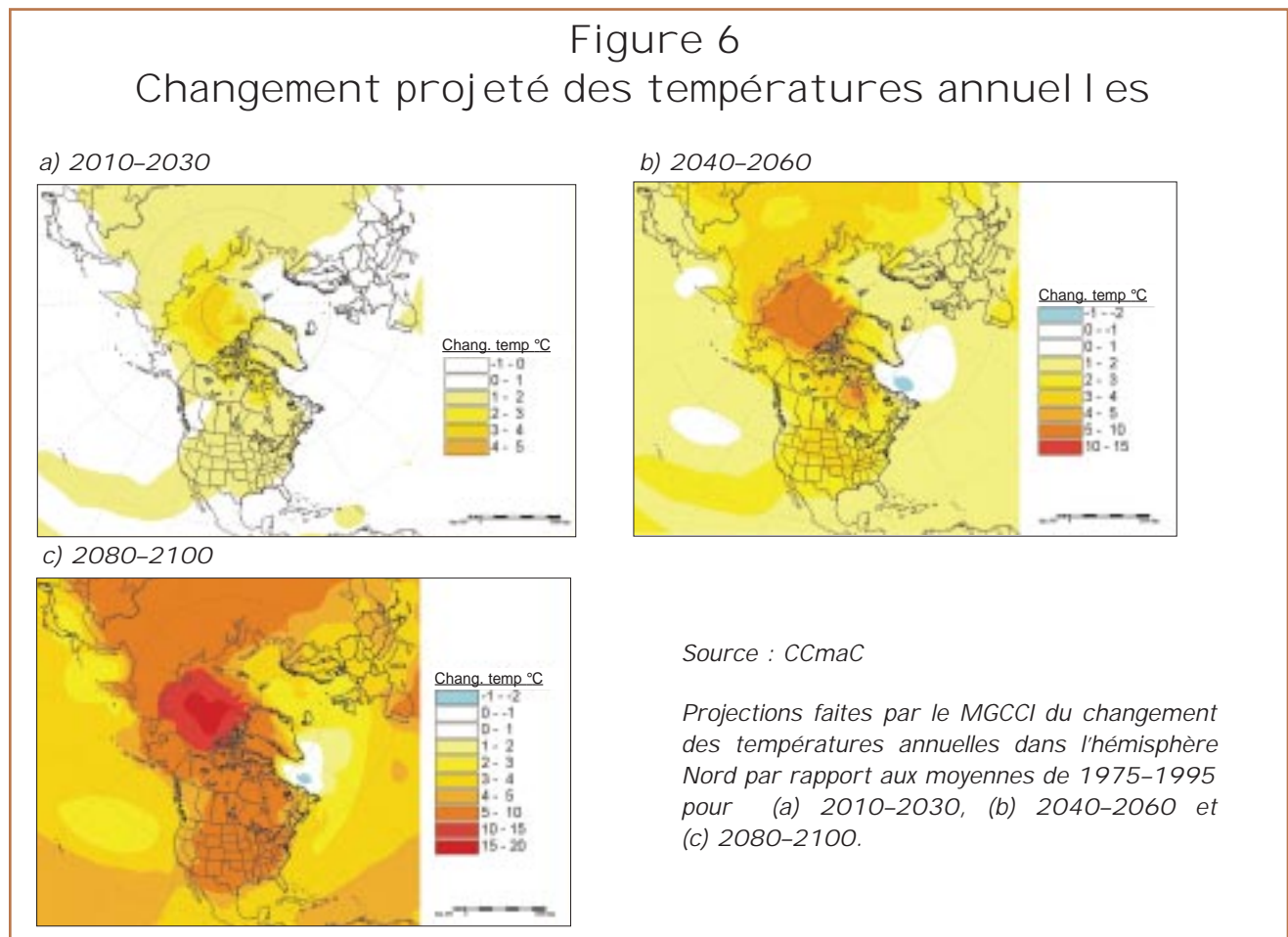
Circulation océanique. Dans l'Atlantique Nord et au large de l'Antarctique, l'eau de surface devient très froide et très salée, et sa densité la fait s'enfoncer rapidement vers le fond de l'océan en certains endroits. Ce processus, appelé « formation d'eau profonde », joue un grand rôle dans le climat de la Terre, parce qu'il induit une circulation « thermohaline » en boucle dans laquelle l'eau froide qui s'enfonce coule vers le sud dans l'océan profond et de l'eau contenant beaucoup de chaleur remonte vers ces latitudes plus élevées, pour y remplacer l'eau qui s'enfonce. Une grande partie de la chaleur de cette eau est transférée à l'atmosphère.

Les simulations du MCGGI, et d'autres modèles, projettent un ralentissement de la circulation thermohaline au cours du XXI^e siècle. En effet, les modèles prédisent qu'un apport accru d'eau douce dans l'Atlantique Nord, dû à l'augmentation des précipitations aux latitudes élevées, devrait réduire la salinité de l'eau de surface et faire baisser de quelque 50 % le taux de formation d'eau profonde en 2100. Cette situation, à son tour, causerait une diminution majeure de l'arrivée d'eau tropicale chaude dans l'Atlantique Nord, qui compenserait en

partie le réchauffement atmosphérique prévu pour la région. Certaines petites régions dans le nord-ouest de l'Atlantique et dans l'océan Austral devraient en fait devenir légèrement plus froides qu'elles ne sont présentement.

Tendances en Amérique du Nord et dans les régions avoisinantes

Alors que les moyennes et régimes planétaires donnent une indication utile de l'ampleur et des caractéristiques générales du changement climatique, c'est aux échelles régionale et locale que ses effets seront ressentis et qu'on y répondra. Les changements régionaux, cependant, pourraient être fort différents des moyennes globales. Il est donc très intéressant de voir comment les modèles prévoient le changement climatique à l'échelle régionale. Les projections du climat pour une région sont cependant généralement moins fiables que celles pour la planète, et exigent qu'on fasse preuve de plus de prudence. Les comparaisons entre modèles sont particulièrement importantes à cet égard comme moyen d'estimer le degré d'incertitude des résultats.



Température. Comme les masses terrestres se réchauffent plus vite que les océans, le réchauffement sur l'Amérique du Nord devrait dépasser la moyenne planétaire. Dans la plus grande partie du centre et du sud de l'Amérique du Nord continentale, par exemple, le modèle montre une élévation des températures moyennes de 1 à 2 °C en 2020, de 2 à 4 °C en 2050 et de 5 à 10 °C en 2090 (Figure 6). Le réchauffement est sensiblement le même en été qu'en hiver. Les régions côtières et les basses latitudes de l'Amérique centrale se réchauffent plus lentement, mais atteignent aussi une hausse de température de 3 à 5 °C en 2090. C'est cependant sur le Haut-Arctique que le réchauffement est maximal, avec une hausse des températures moyennes annuelles atteignant jusqu'à 3 à 4 °C en 2020, 5 à 10 °C en 2050, et plus de 15 °C dans certains secteurs en 2090.

Les changements en hiver dans l'Arctique sont encore plus spectaculaires, avec des températures moyennes dépassant la moyenne actuelle de beaucoup plus de 20 °C en 2090 (Figure 7). Bien sûr, comme les températures hivernales actuelles dans l'Arctique peuvent descendre bien en-dessous de -40 °C, les hivers y seraient encore froids, mais les résultats du modèle impliquent qu'ils seraient beaucoup moins extrêmes. D'un autre côté, les températures estivales ne montent pas autant, en rai-

son de l'effet modérateur des eaux froides de l'océan Arctique.

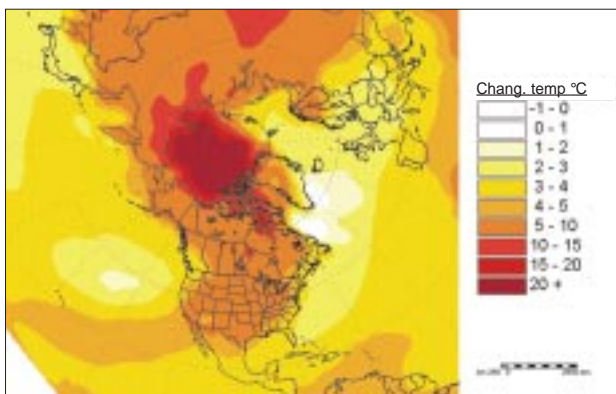
Il y a deux facteurs qui ont une importance particulière dans le changement des températures dans l'Arctique. D'abord, avec le recul de la couverture nivale sur les terres et de la couverture glacielle sur l'océan, la surface de l'Arctique, au lieu de réfléchir comme actuellement une grande partie du rayonnement solaire incident, en absorberait beaucoup plus. Le supplément d'énergie solaire absorbé par la surface s'ajouterait au réchauffement qui a déjà eu lieu. Cet effet est particulièrement important au printemps et en automne dans tout l'Arctique, et aussi en été dans les régions les plus septentrionales. Le second facteur est que, à mesure que le climat se réchauffera, la glace se formera plus tard en automne sur les eaux de l'Arctique, disparaîtra plus tôt au printemps, et sera plus mince en hiver. Son rôle d'isolant entre l'air froid de l'hiver et l'océan plus chaud se trouvera réduit. Il y aura donc plus de chaleur qui pourra être transférée de l'océan dans l'air de l'Arctique pendant la saison froide. L'inverse est bien entendu vrai en été, saison où l'océan se réchauffe beaucoup plus lentement que l'air, ce qui réduit la vitesse de réchauffement de l'atmosphère.

Les tendances des températures sur la masse terrestre du nord de l'Asie sont en gros semblables à celles de

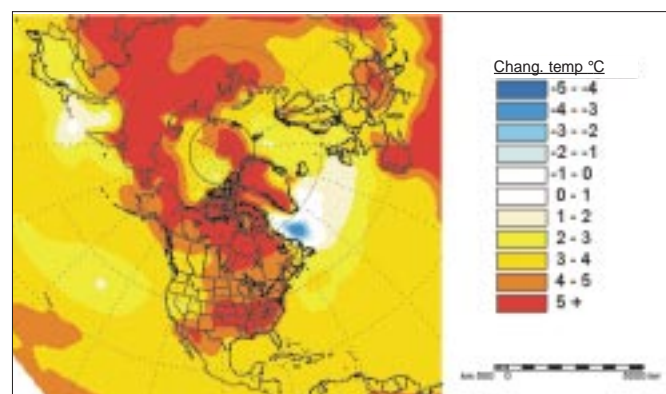
Figure 7

Changement projeté des températures saisonnières

a) l'hiver



b) l'été.



Source : CCmaC

Projections faites par le MCCGI du changement des températures saisonnières dans l'hémisphère Nord pour la période 2080–2100 par rapport aux valeurs de 1975–1995 pour (a) l'hiver et (b) l'été.

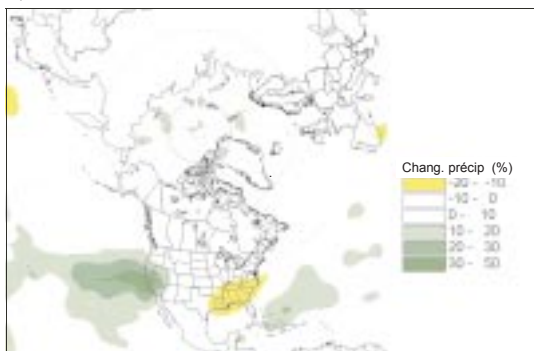
l'Amérique du Nord, le réchauffement sur l'intérieur du continent atteignant 5 à 10 °C en 2090. Cependant, la zone de réchauffement hivernal plus fort correspondant aux régions polaires de l'Amérique du Nord s'étend plus loin vers le sud, jusqu'aux latitudes moyennes. L'Europe, par contre, se réchauffe moins que le nord de l'Asie ou que l'Amérique du Nord. Un des facteurs pourrait en être une rétroaction plus faible de l'albédo de la neige, puisque l'Europe connaît aussi présentement une couverture nivale de moindre étendue. Cependant, une autre influence significative pourrait être le ralentissement du transport de chaleur vers le nord dans l'Atlantique Nord. À l'heure actuelle, les eaux chaudes de l'océan tropical entraînées vers le nord-est par cette circulation libèrent assez de chaleur pour maintenir, sur une grande partie de l'Europe, des températures de quelque 10 °C plus élevées qu'aux latitudes semblables d'autres régions de l'hémisphère Nord. Avec la réduction de moitié du taux de formation d'eau profonde que projette le modèle, l'arrivée d'eau chaude dans l'Atlantique Nord sera aussi ralentie et ses effets de réchauffement sur le nord de l'Europe seront affaiblis, ce qui compensera une partie des effets du réchauffement planétaire. C'est pourquoi le MCCGI projette que les températures moyennes dans le nord et le

centre de l'Europe n'auront monté que de quelques degrés en 2050 et d'environ 3 à 5 °C en 2090. Le réchauffement du sud de l'Europe, où les effets de la circulation atlantique sont minimes, sera semblable à celui de l'Amérique du Nord.

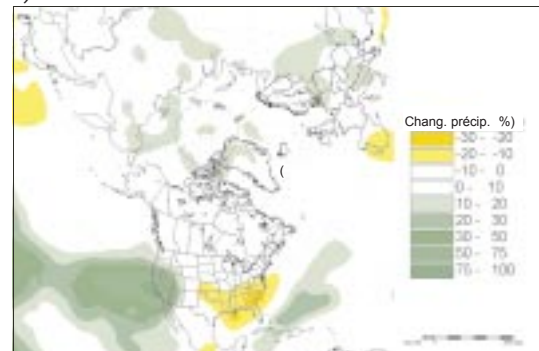
Par contraste avec le réchauffement polaire amplifié projeté par le modèle pour les masses terrestres de l'hémisphère Nord et pour l'océan Arctique, le Pacifique Nord et l'Atlantique Nord se réchauffent plus sous les tropiques et moins aux latitudes moyennes à élevées. Cet état de choses semble lié au fait que le transport de chaleur des tropiques aux latitudes plus élevées est plus faible quand la circulation océanique ralentit. Par conséquent, bien que les températures de l'air s'élèvent plus lentement dans les régions tropicales des deux océans que sur les terres, elles auront cependant monté de 1 à 3 °C en 2050 et de 3 à 5 °C en 2090. Aux latitudes moyennes, d'un autre côté, le réchauffement du Pacifique Nord et d'une grande partie de l'Atlantique Nord est limité à 2 à 4 °C en 2090, certaines régions de la mer du Labrador et au sud du Groenland ne montrant aucun changement significatif et, même, une petite zone à l'est du Labrador connaissant un léger refroidissement, surtout en été.

Figure 8
Changement projeté des précipitations annuelles

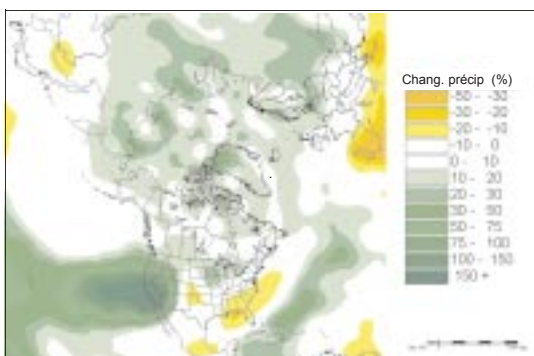
a) 2010-2030



b) 2040-2060



c) 2080-2100

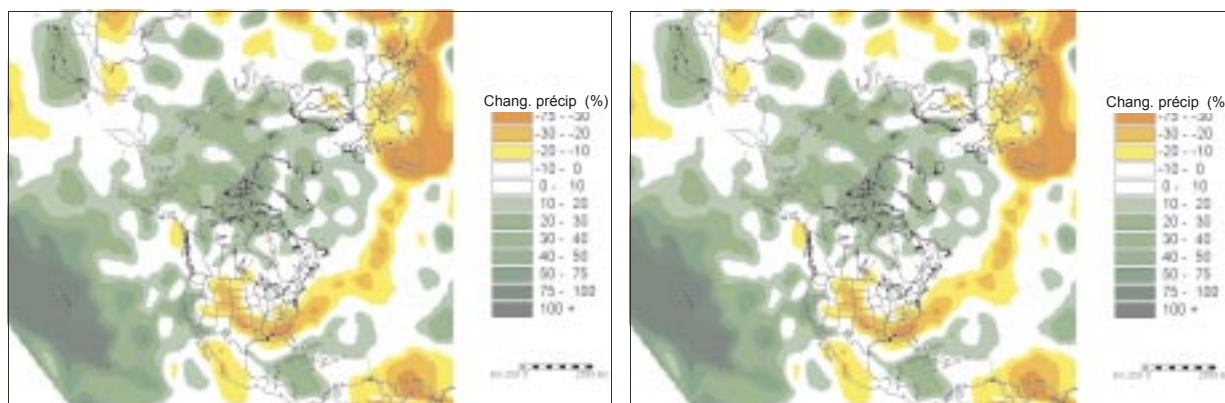


Source : CCmaC

Projections faites par le MCCGI des changements des précipitations par rapport aux moyennes de 1975-1995 pour (a) 2010-2030, (b) 2040-2060 et (c) 2080-2100.

Figure 9

Changement projeté des précipitations saisonnières



a) l'hiver

b) l'été.

Source : CCmaC

Projections faites par le MCCGI des changements des précipitations saisonnières en 2080–2100 par rapport aux moyennes de 1975–1995 pour (a) l'hiver et (b) l'été.

Changements des précipitations et de l'hydrologie.

Bien que le modèle MCCGI indique une augmentation des précipitations moyennes sur la planète au cours du prochain siècle, il y a des variations notables d'une région à l'autre. Dans le Pacifique tropical, le modèle projette une tendance du type El Niño, avec une baisse des précipitations dans l'ouest du Pacifique mais une hausse marquée dans l'est jusque sur une grande partie de l'ouest des États-Unis. Ces simulations suggèrent que la pluviométrie moyenne annuelle sur la plus grande partie de la Californie, par exemple, pourrait dépasser les valeurs actuelles de 30 à 50 % en 2020, de 100 % en 2050, et de plus de 150 % en 2090 (Figure 8). Les changements sont plus prononcés en hiver qu'en été (Figure 9). Par contraste, une grande partie du centre et du sud de l'Amérique du Nord pourrait connaître des baisses significatives des précipitations annuelles d'ici 2090, surtout dans le sud-est, où on prévoit qu'elles pourraient atteindre 30 %. Ces diminutions sont plus marquées en hiver qu'en été. Le sud de l'Europe pourrait aussi voir des baisses dépassant 30 %.

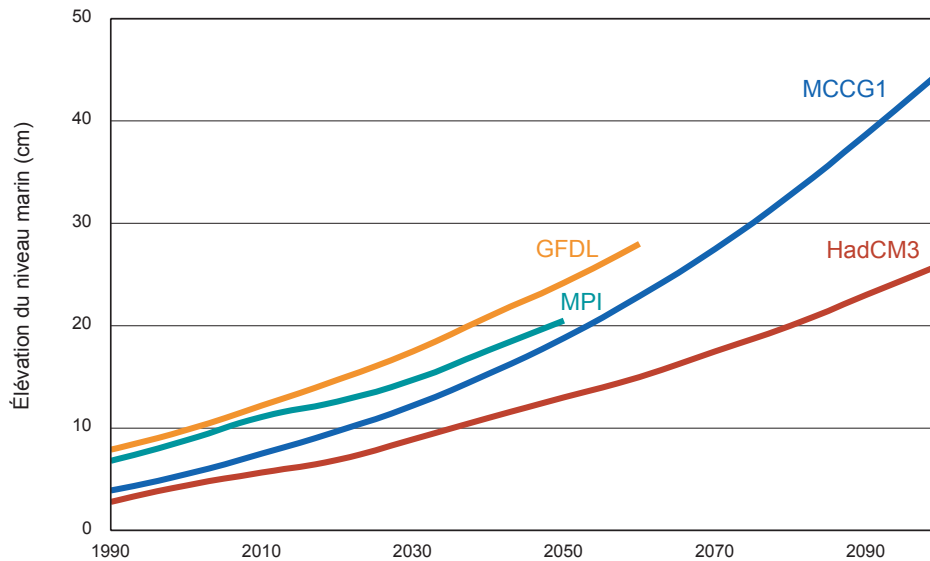
Les changements projetés pour les latitudes moyennes à élevées de l'hémisphère Nord sont moins marqués, restant en général dans une plage de 10 % des niveaux actuels jusqu'après 2050. En 2090, les précipitations sur la plus grande partie du Canada et du nord de l'Eurasie augmentent de 10 à 20 % mais, dans certaines régions, comme le nord du Groenland et le nord de la

Sibérie (qui reçoivent actuellement très peu de précipitations), l'augmentation peut atteindre 50 %. La plus grande partie de ces augmentations surviennent pendant l'hiver. Ces tendances concordent à la fois avec une augmentation du flux d'humidité des tropiques vers le nord et avec un passage à un climat plus maritime à mesure que la quantité de glace de mer sur les masses d'eau diminue.

Combinés à des températures plus élevées, ces changements des précipitations pourraient avoir des répercussions importantes sur l'humidité du sol. Le modèle indique, par exemple, que la plus grande partie de l'Amérique du Nord connaîtrait une baisse notable de l'humidité du sol disponible, exception faite de la côte ouest, où les conditions deviendraient beaucoup plus humides. En outre, la réduction de l'humidité du sol serait plus importante en été. Dans les années 2090, des régions comme le sud des Prairies canadiennes seraient aux prises avec de graves déficits de l'humidité du sol en été.

Ces changements illustrent la sensibilité au changement planétaire des températures et des ressources en eau régionales mais, comme toutes les projections d'échelle régionale, celles-ci sont entachées de beaucoup d'incertitude et doivent être utilisées avec prudence. Les évaluations des éventuels impacts régionaux du changement climatique ne devraient jamais être utilisées isolément, mais bien en prenant aussi en compte les résultats d'autres modèles.

Figure 10
Élévation projetée du niveau marin



Sources : CCmaC; centre de distribution de données du GIEC

Élévation du niveau marin par dilatation thermique de l'eau de mer projetée par le MCGG1 et trois autres modèles. Les taux de changement pour les trois modèles sont très similaires, tandis que le quatrième est plus bas.

Élévation du niveau marin. On s'attend à ce que le niveau des mers monte à mesure que l'atmosphère et les océans de la planète se réchaufferont. Cette situation est due surtout à la dilatation thermique de l'eau des océans ; la fonte des glaciers et les changements de volume des calottes glaciaires polaires pourraient aussi jouer des rôles significatifs, bien que secondaires. Les résultats (Figure 10) montrent que la dilatation thermique pourrait avoir fait monter le niveau planétaire moyen des mers d'environ 5 cm au cours du XX^e siècle et induire une hausse supplémentaire de 40 cm d'ici les vingt dernières années du XXI^e siècle. Ces chiffres dépassent les valeurs avancées en 1995 par le GIEC, qui établissait l'élévation due à la dilatation thermique à 26 cm d'ici 2100, mais l'ampleur et la vitesse de l'élévation du niveau marin sont généralement semblables à celles projetées par certaines autres récentes expériences de modélisation.

Les projections de l'élévation du niveau marin faites à l'aide du MCGGI montrent aussi des différences régionales marquées (Figure 11). Dans l'océan Arctique, par exemple, la dilatation thermique entraîne une élévation de seulement environ 10 cm d'ici 2090. Par compara-

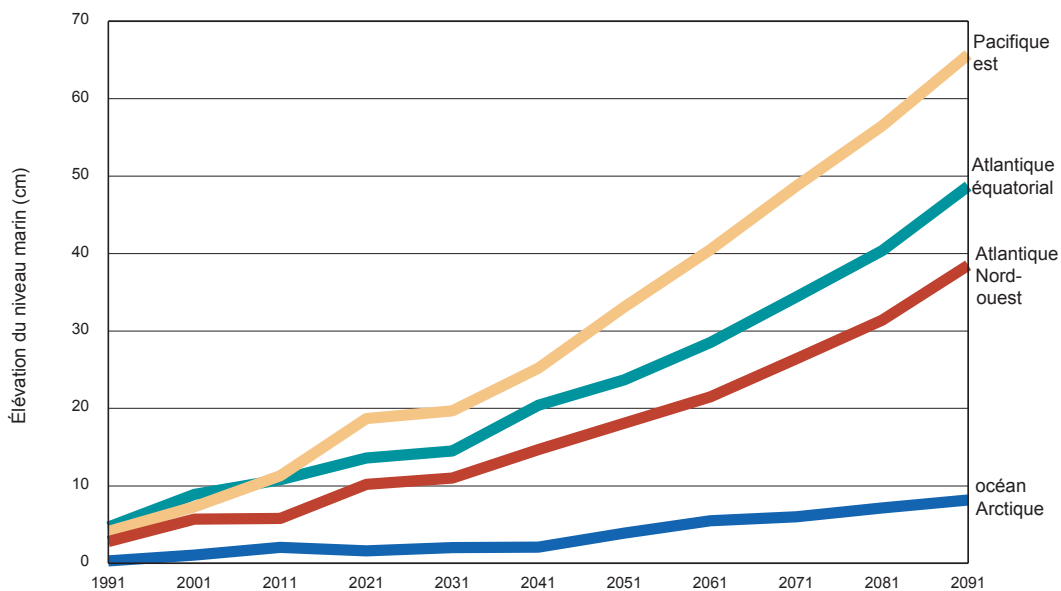
ison, l'est du Pacifique au large de la Colombie-Britannique monte de 65 cm, l'Atlantique équatorial de 50 cm, et le nord-ouest de l'Atlantique à l'est des Maritimes de 40 cm. Ces résultats sont le reflet des différences régionales des changements de la température de l'océan, et d'autres facteurs.

Phénomènes extrêmes.

On appelle phénomènes extrêmes ceux qui sont rares tant par leur intensité que par leur fréquence d'occurrence. Comme les écosystèmes et l'infrastructure physique des sociétés humaines sont « réglés » sur les conditions climatiques normales, ils sont généralement mal équipés pour faire face à ces phénomènes. C'est pourquoi les changements dans l'occurrence des phénomènes extrêmes peuvent souvent avoir sur les écosystèmes et les sociétés humaines des impacts beaucoup plus tragiques qu'un changement des conditions climatiques moyennes.

Jusqu'à un certain point, il est bien subjectif de déterminer ce qui est ou n'est pas un phénomène extrême. Les climatologues ont donc recours à divers critères statistiques. L'un des plus courants est le concept de période de

Figure 11
Changements régionaux du niveau marin



Source : CCmaC

Étant donné les différences de vitesse de réchauffement des océans et les changements locaux des régimes de pression atmosphérique, les vitesses de changement du niveau marin dû à la dilatation thermique varient significativement d'une région à l'autre.

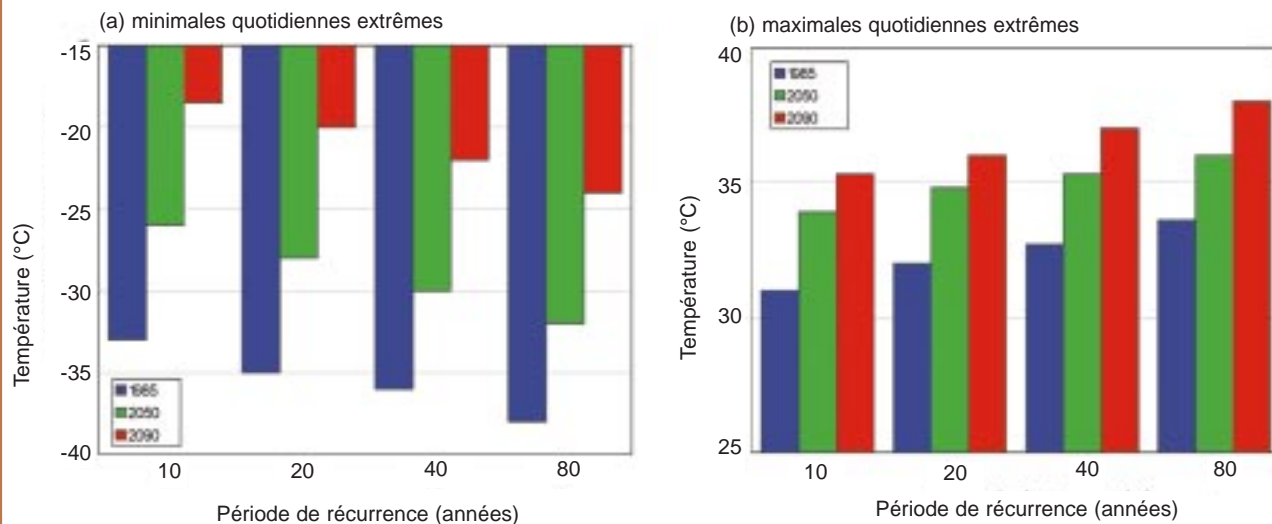
réurrence. Par exemple, un phénomène extrême pourrait être décrit comme n'ayant pas une probabilité statistique de se produire plus d'une fois en 20 ans. On dit alors qu'il a une période de récurrence de 20 ans.

À l'heure actuelle, des modèles comme le MCCGI ne peuvent nous donner que des réponses partielles aux questions que nous nous posons sur les événements extrêmes. Les meilleures informations qu'ils peuvent fournir concernent les changements d'extrêmes qui surviennent sur une grande échelle spatiale, comme ceux des températures ou des vitesses des vents; ils peuvent aussi donner des informations utiles sur le sens des changements des extrêmes d'autres variables climatiques. Cependant, comme leur résolution est assez basse, les modèles actuels se prêtent mal à la fourniture d'information plus détaillée, surtout au niveau régional, qui est pourtant celui de nombreux événements extrêmes. De plus, comme les extrêmes sont peu fréquents, on doit avoir des périodes de simulation très longues avant de disposer d'assez de ces phénomènes pour effectuer une analyse statistique fiable. De même, il faut de très longs enregistrements d'observations d'épisodes réels pour

qu'on puisse constituer la base de référence à laquelle comparer les résultats du modèle. Il peut donc être très difficile de valider la performance du modèle dans la simulation des extrêmes. Quelques études ont tenté de se sortir de ce dilemme en emboitant dans le modèle du climat du globe un sous-modèle de très haute résolution pour une région donnée. Cependant, la plupart des études faites avec les modèles globaux de la présente génération se concentrent encore surtout sur les aspects à plus grande échelle des changements des extrêmes climatiques. Les études avec le MCCGI décrites ici ont adopté cette approche et visé en premier les changements à grande échelle des extrêmes de pression en surface, de température, de précipitations et de vent. Certains détails d'échelle régionale ont aussi été inclus dans ces études, mais ils reçoivent beaucoup moins de confiance que les résultats à plus grande échelle. On trouvera ci-dessous quelques résultats généraux issus de ces études.

Figure 12

Changement projeté des températures extrêmes



Source: Kharin et Zwiers (2000)

Projections faites par le MCCGI des changements de l'intensité des moyennes canadiennes des températures (a) minimales quotidiennes extrêmes et (b) maximales quotidiennes extrêmes que l'on peut.

Extrêmes quotidiens de température. Comme l'a noté le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat dans son *Deuxième Rapport d'évaluation*, en 1995, de petits changements des conditions climatiques moyennes peuvent entraîner des changements significatifs des extrêmes. Cependant, les changements des extrêmes de températures peuvent aussi être grandement influencés par des changements d'autres facteurs climatiques. Par exemple, la disparition de la couverture nivale fait monter considérablement le réchauffement diurne en surface, et donc les maximums de l'après-midi. Inversement, une hausse des températures moyennes aura certes tendance à réduire l'occurrence de temps extrêmement froid mais, dans certaines régions, la disparition de la couverture de glace de mer ou de neige intensifiera considérablement cet effet modérateur en permettant le transfert de beaucoup plus de chaleur de l'océan vers l'atmosphère, surtout la nuit.

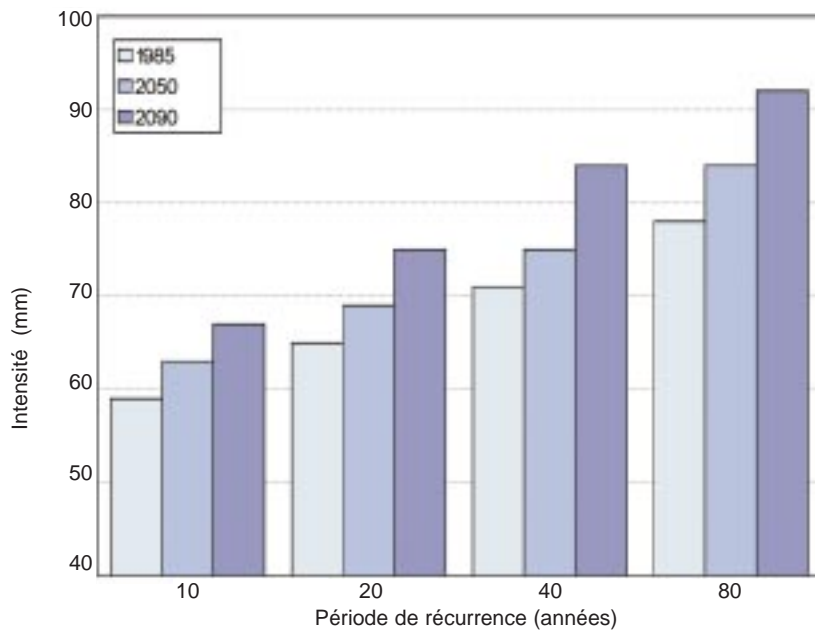
Comme le montre la figure 12, les extrêmes de froid au Canada (représentés par la température minimale quotidienne) devraient avec le temps devenir moins rigoureux. Pour 2050, par exemple, le modèle indique que

des extrêmes de froid qui se produisent actuellement aux 10 ans surviendraient moins d'une fois en 80 ans. Dans certaines régions, ces changements seront encore plus spectaculaires. Dans l'Arctique, où l'on projette une hausse des températures annuelles moyennes de 10 à 20 °C dans la seconde moitié du siècle, les extrêmes de minimum sur les eaux libres devraient être considérablement atténués. Les extrêmes de minimum à période de récurrence de 20 ans, par exemple, seront plus élevés que maintenant sur l'océan libre : de 25 °C dans les années 2050 et de 40 °C dans les années 2090.

Alors que, dans un climat plus chaud, les extrêmes de minimum deviendront généralement plus modérés, les extrêmes de maximum devraient au contraire devenir encore plus élevés. On remarque cette hausse dans les projections du MCCGI pour les extrêmes de maximum quotidien moyennés sur le Canada. Elles indiquent qu'un extrême de maximum qui a présentement une période de récurrence de 80 ans se produirait tous les 10 ans dans les années 2050. Dans les années 2090, l'intensité de ces épisodes d'extrêmes de maximum devrait monter en moyenne de 4 à 5 °C.

Figure 13

Changement projeté des précipitations extrêmes



Source : Kharin et Zwiers (2000)

Intensité moyenne des épisodes extrêmes de pluie en 24 heures au Canada, pour diverses périodes de récurrence, telles que projetées par le MCGI.

Divers processus physiques peuvent cependant produire d'intéressantes variations régionales des extrêmes de maximum projetés par le MCGI. Dans les régions arctiques et subarctiques, par exemple, les extrêmes de maximum à période de récurrence de 20 ans sont sensiblement les mêmes en 2050 et modérément différents en 2090, puis les eaux océaniques de ces régions se réchauffent très peu. Dans le nord-ouest de l'Atlantique, comme dans d'autres régions où le modèle indique un refroidissement de l'océan en été, l'extrême à récurrence de 20 ans baisse en fait. Un phénomène similaire se produit en Inde, où le seuil des extrêmes de maximum quotidien commence par baisser, puis revient aux niveaux actuels, dans ce cas en raison d'une augmentation des pluies de mousson. La situation est très différente dans certaines régions comme le sud-est des États-Unis et les plaines du centre de l'Amérique du Nord, où la baisse de l'humidité du sol se traduit par une réduction de l'évaporation et donc une augmentation du réchauffement de l'air en surface. Dans ces régions, la hausse des extrêmes de maximum quotidien projetés par le MCGI peut atteindre 12 °C d'ici 2050, alors que les températures quotidiennes moyennes ne varient que de 3 à 4 °C pendant la même période.

Extrêmes de précipitations. Les analyses des périodes de récurrence des épisodes de précipitations extrêmes dans les simulations du MCGI suggèrent que les pluies deviendront en moyenne plus intenses dans presque toutes les régions du monde, mais que l'ampleur de ces changements demeure entachée d'incertitude. Certains des augmentations les plus marquées devraient survenir dans les régions équatoriales, surtout sur le Pacifique tropical. Dans cette région, le MCGI projette que les taux de précipitations des extrêmes à récurrence de 20 ans monteront de quelque 50 mm par jour d'ici 2050 et de plus de 70 mm par jour d'ici la fin du siècle. Un élément important de ces changements est l'augmentation de l'évaporation de l'eau des océans à mesure qu'ils se réchauffent. Sur l'Amérique du Nord continentale, le changement des taux moyens de précipitation des extrêmes à récurrence de 20 ans pourrait atteindre jusqu'à 10 mm par jour dans les années 2050. Ces changements suggèrent déjà que les épisodes de précipitations destructrices pourraient doubler de fréquence. Dans les années 2090, cependant, les simulations indiquent des augmentations pouvant atteindre 40 mm par jour pour les extrêmes à récurrence de 20 ans dans la région du golfe du

Mexique et le sud-est des États-Unis, et des augmentations de 10 à 20 mm par jour dans l'est du Canada. Quand on en fait la moyenne pour la totalité du Canada, les actuels extrêmes à récurrence de 40 ans pourraient devenir des événements décennaux d'ici les années 2090 (Figure 13).

Les résultats de ces simulations suggèrent aussi que, avec le réchauffement du climat, les durées extrêmes des périodes humides (journées avec plus de 1 mm de pluie) pourraient diminuer sur un grand nombre de régions tropicales et subtropicales des continents. L'impact projeté sur les durées extrêmes des périodes sèches (journées consécutives avec moins de 1 mm de pluie) semble plus variable. Celles-ci devraient être plus longues dans la région méditerranéenne, le sud de l'Afrique et le sud-est de l'Asie, mais plus courtes sur la plus grande partie du centre de l'Afrique et peu changer en Amérique du Sud. On prévoit aussi peu de changement pour le Canada. Cependant, l'ampleur de tous ces changements des périodes humides et sèches est encore plus incertaine que pour les extrêmes de précipitations.

Épisodes intenses de basse pression. Les fortes tempêtes sont identifiées dans les climats du modèle sous la forme de zones de basse pression, et la gravité d'une tempête donnée peut être évaluée par l'intensité de la baisse de pression en son centre. Les expériences de changement à l'équilibre effectuées avec les premiers modèles de l'atmosphère montraient une baisse générale des conditions de tempête en réaction à un doublement des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone. Cependant, on notait une augmentation significative des tempêtes extra-tropicales très intenses (définies par une pression centrale inférieure à 97 kPa). Une étude du comportement des tempêtes a aussi été faite à l'aide des simulations aux états transitoires du MCCGI. Elle a donné des résultats similaires : une faible baisse du nombre total de tempêtes extra-tropicales dans le monde d'ici 2090, mais une augmentation de plus de 30 % du nombre des tempêtes très intenses. Le modèle indique que les changements les plus importants concernent l'occurrence de tempêtes intenses dans l'hémisphère Sud.

ORIENTATIONS FUTURES

La modélisation du climat est un processus en évolution, dans lequel les modèles sont constamment raffinés, de manière que les mécanismes climatiques puissent être simulés de façon de plus en plus réaliste, et que l'on puisse accorder de plus en plus de confiance aux résultats. Au Centre canadien de modélisation et d'analyse du climat, ce processus a mené au développement d'une deuxième, puis d'une troisième génération de modèles couplés du climat.

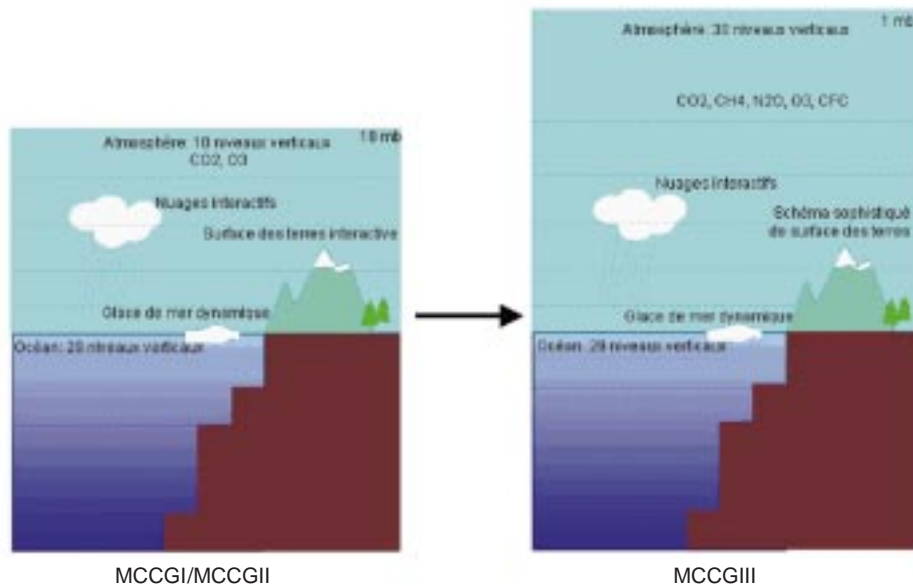
Le modèle de deuxième génération, le MCCGII, utilise la même composante atmosphérique que le MCCGI, mais sa composante océanique a été améliorée par l'ajout d'un schéma de mélange plus réaliste. Le nouveau modèle a également une composante glace de mer plus sophistiquée, qui simule le transport de la glace de mer et les effets de la déformation de la glace, deux éléments qui influent sur le flux d'énergie entre l'atmosphère et l'océan. Le transport de la glace de mer détermine également à quel endroit la glace finira par fondre. Le MCCGII a été testé et est présentement utilisé dans les expériences de changement climatique.

Au début de 2000, le modèle de troisième génération, comprenant à la fois un modèle atmosphérique de troisième génération et un nouveau modèle océanique, en

était à un stade avancé de développement (Figure 14). Le modèle atmosphérique, le MCGIII, est une version avancée du MCGII. Comme son prédécesseur, il a une résolution physique de 3,7 degrés de latitude et de longitude, mais les processus régissant le mouvement de l'eau de mer sont simulés à une résolution plus élevée, d'environ 2,8 degrés de latitude (environ 275 km) par 2,8 degrés de longitude. Il a aussi une plus grande épaisseur verticale. Alors que le MCGII couvre 30 km d'atmosphère en 10 niveaux, l'atmosphère du MCGIII s'étend jusqu'à quelque 50 km au-dessus de la surface de la Terre, et comporte 32 niveaux. Parmi les autres caractéristiques de la composante atmosphérique :

- une nouvelle méthode de description des processus prenant place à la surface des terres. Connue sous le nom de CLASS, ce nouveau schéma de surface des terres est beaucoup plus détaillé que le schéma à couche de sol unique utilisé dans le MCGII. Il inclut trois couches de sol, une couche de neige au besoin, et peut représenter les effets d'une couverture végétale. Des propriétés de la surface telles que la rugosité et la réflectivité sont associées aux types de sol et de végétation, ainsi qu'à l'humidité du sol dans une maille

Figure 14
Amélioration de la structure du MCGG



Source: G. Flato

Comparaison schématique de certaines des différences entre les structures du MCGGI et du MCGGII avec celle du MCGGIII.

donnée du modèle;

- une meilleure représentation du transfert turbulent de chaleur et d'humidité, et du mouvement de l'atmosphère dans la couche limite planétaire (la couche de l'atmosphère la plus proche de la surface);
- une meilleure simulation du comportement de la convection dans l'atmosphère (comme celle associée aux cumulus);
- une description plus détaillée du réchauffement solaire;
- une meilleure représentation de la topographie;
- une simulation améliorée des champs de vent et de pression en surface.

Le nouveau modèle océanique, appelé NCOM1.3, a été développé au National Center for Atmospheric Research, à Boulder (Colorado). Basé sur le modèle MOM utilisé dans le MCGGI et le MCGGII, il inclut des améliorations de la représentation des processus physiques de l'océan et a été codé de manière à tirer parti d'une architecture informatique plus moderne. La composante glace de mer est semblable à celle utilisée dans le

MCGGII, mais a été améliorée de sorte que le modèle peut maintenant déterminer quelles proportions de chaque maille sont couvertes de glace et d'eau libre.

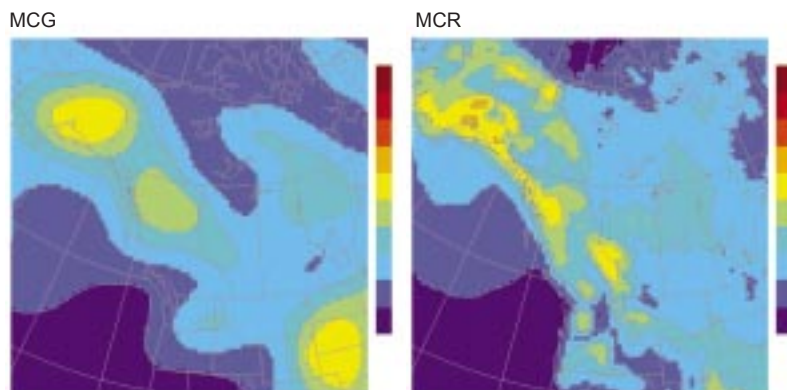
Modèles des climats régionaux

En arriver à une meilleure simulation du climat à l'échelle de la région reste un des plus grands défis qui se posent pour les modélisateurs. Le principal obstacle est la résolution relativement grossière des modèles actuels du climat mondial, puisque nombre des processus qui régissent les climats régionaux interviennent sur une échelle plus petite que la plus petite unité spatiale, ou maille, que les modèles peuvent aujourd'hui représenter. Les modèles utilisent diverses méthodes pour approximer l'effet moyen de ces processus, mais les variations locales sont nécessairement laissées de côté. Des modèles planétaires de résolution beaucoup plus élevée permettraient de résoudre ce problème, mais exigeraient aussi beaucoup plus de capacité informatique. Doubler la résolution sur les trois dimensions et réduire le pas de temps, par exemple, exige de multiplier par un facteur de plus de seize les exigences de calcul.

Les modèles des climats régionaux (MCR) sont devenus la solution préférée pour régler ce problème. Ce sont des modèles de haute résolution, qui peuvent simuler les caractéristiques climatiques et les processus physiques avec beaucoup plus de détail sur une partie limitée de la planète tout en puisant l'information sur les conditions aux limites dans les modèles globaux plus vastes. Un MCR canadien a récemment été développé grâce à la collaboration d'une équipe de modélisation de l'Université du Québec à Montréal et de l'équipe du CCmaC de Victoria. Le modèle régional représente les processus physiques essentiellement comme le fait le MCGII, et comporte toutes les caractéristiques avancées de ce modèle. Le MCR canadien peut être utilisé pour n'importe quelle région de la planète, être emboîté dans le modèle global et tourner en tandem avec lui. L'emboîtement est cependant un processus à sens unique : l'information passe du modèle global au modèle régional, mais ne peut pas être retransmise au premier.

La performance du MCR canadien a récemment été testée dans une série de simulations du climat actuel et d'un climat à doublement du dioxyde de carbone pour l'ouest du Canada. Avec une résolution spatiale de 45 km (presque 10 fois meilleure que celle du MCGII, dans lequel il était emboîté), il a montré davantage de variabilité spatiale et de détail du climat à proximité de la surface, comme on pouvait s'y attendre du fait du supplément de détails topographiques représentés. Cependant, il y avait peu de changement de la variabilité spatiale dans l'atmosphère libre, bien au-dessus de la surface.

Au début de 2000, trois expériences de « tranche de temps » pour l'époque actuelle et deux périodes du XXI^e siècle avaient été réalisées pour l'ouest du Canada, et un ensemble similaire pour l'est du pays devait être entrepris sous peu. Ces expériences utilisaient les sorties d'une des expériences aux états transitoires décrites plus haut.



Source: G. Flato

Comparaison des détails des régimes de précipitations sur l'ouest du Canada, simulés par le MCGII et le MCR canadien.

CONCLUSION

Quelle valeur ont les recherches de modélisation sur le climat? Qu'ajoutent-elles à notre compréhension du changement climatique? Et quelle confiance pouvons-nous accorder aux résultats?

La capacité des expériences menées avec le MCCGI à bien reproduire les caractéristiques générales du climat planétaire depuis 1900 est une bonne indication que sa simulation des processus climatiques est correcte dans les grandes lignes, et nous pouvons donc être raisonnablement confiants que ses estimations de l'évolution probable du climat au cours du prochain siècle sont réalistes. Les résultats des expériences visant le changement climatique à venir effectuées avec le MCCGI et d'autres modèles évolués confirment ce qu'avaient indiqué les modèles antérieurs, à savoir que la probabilité d'un vaste changement du climat est à la fois réelle et imminente. Ils suggèrent que la vitesse et l'ampleur du réchauffement au cours du prochain siècle se situeront certainement dans le haut de la plage prévue précédemment, sinon au-dessus. Si c'est le cas, tant les écosystèmes naturels que les sociétés humaines auront de la difficulté à s'adapter à un changement climatique d'une rapidité à peu près sans précédent. Les risques associés à cette situation sont donc considérables.

Ceci dit, il faut cependant garder à l'esprit que les sorties des modèles sont des approximations et non une prévision exacte des conditions futures. L'exactitude des projections du modèle dépend, en partie, de celle des hypothèses quant aux changements futurs des gaz à effet de serre et des aérosols, ainsi que de la précision avec laquelle il simule des processus climatiques tels que la réponse de la vapeur d'eau et des nuages, ou les changements de la circulation océanique. Si les concentrations de gaz à effet de serre changent à des vitesses significativement différentes des estimations utilisées dans le modèle, alors les projections de celui-ci deviennent de moins en moins réalistes. Les changements de forces naturelles qui

ne sont pas prises en compte par le modèle pourraient aussi avoir un effet notable sur le déroulement du changement climatique. Par exemple, une flambée de l'activité volcanique ou une baisse de l'intensité du rayonnement solaire pourraient ralentir l'élévation de la température de la planète. Malgré cela, il est peu probable que ces forces fassent plus que compenser partiellement la croissance régulière des effets de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre. Par ailleurs, la mesure dans laquelle les aérosols pourront masquer les pleins effets de l'accroissement des concentrations de gaz à effet de serre a pu être sous-estimé, ou la réponse des océans à la hausse des températures pourrait être plus brutale que ne le prévoient les modèles. Dans ce cas, le changement risque d'être beaucoup plus rapide et dangereux que ne le projettent les expériences avec le MCCGI.

Maintenant que les décideurs commencent à s'attaquer à l'énorme défi de réduire les émissions de gaz à effet de serre en mettant en œuvre le Protocole de Kyoto, en négociant de nouvelles ententes internationales et en élaborant des politiques pour atténuer les impacts nocifs du changement climatique, il nous faudra disposer de modèles améliorés des climats du globe et des régions qui donneront des indications de plus en plus fiables des conséquences d'un changement climatique non atténué et de la capacité des diverses options de réduction des émissions de gaz à effet de serre à faire baisser les risques du changement. On aura aussi besoin de tels modèles pour avoir des scénarios plausibles du climat futur permettant de tester la sensibilité des écosystèmes et des infrastructures sociales au changement climatique à venir et d'entreprendre l'énorme tâche de développer des stratégies d'adaptation adéquates pour réduire les risques connexes. Les efforts que déploieront le CCmaC et d'autres groupes de modélisation promettent de contribuer de façon significative à l'avancement des connaissances scientifiques sur ces sujets.

BIBLIOGRAPHIE

Boer, G.J., G. Flato and D. Ramsden. 2000. A transient climate change simulation with greenhouse gas and aerosol forcing: projected climate for the 21st century. *Climate Dynamics* (in press).

Boer, G.J., G. Flato, M.C. Reader and D. Ramsden. 2000. A transient climate change simulation with greenhouse gas and aerosol forcing: experimental design and comparison with the instrumental record for the 20th century. *Climate Dynamics* (in press)

Flato, G.M., G.J. Boer, W.G. Lee, N.A. McFarlane, D.Ramsden, M.C. Reader and A.J. Weaver. 2000. The Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis Global Coupled Climate Model and its climate. *Climate Dynamics* (in press).

Hansen, J.E., M. Sato and R. Ruedy.1997. Radiative forcing and climate response. *Journal of Geophysical Research* **102**: 6831-6864.

Houghton, J.T., B.A. Callander and S.K. Varney (eds). 1992. *Climate Change 1992*. The supplementary report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press.

Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. harris, A. Kattenberg and K. Maskell (eds.). 1996. *Climate Change 1995: The science of climate change*. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC Data Distribution Centre. Data web site at <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/>.

Kharin, V.V. and F.W. Zwiers. 2000. Changes in the extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM. *J. Climate* (in press).

Lean, J., J. Beer and R. Bradley. 1995. Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. *Geophysical Research Letters* **22**: 3195-3198.

NOAA. Climate data web site at <http://www.ncdc.noaa.gov/ol/climate/research/>

Schimel, D., D. Alves, I. Enting, M. Heimann et al. 1996. Radiative forcing of climate change. In *Climate Change 1995: The science of climate change*. Contribution of Working Group I to the second assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell, eds. Cambridge University Press, Cambridge.

Shine, K.P., R.G. Derwent, D.J. Wuebbles and J.J. Morcrette. 1990. Radiative forcing of climate. In *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*. J.T. Houghton, G.J. Jenkins and J.J. Ephraums, eds. Cambridge University Press, Cambridge.