



S'ADAPTER

aux changements climatiques



S'ADAPTER aux changements climatiques

OURANOS • 2004

Ouranos est un consortium de recherche sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques, initiative conjointe du Gouvernement du Québec, d'Hydro-Québec et du Service météorologique du Canada avec la participation de l'UQAM, des universités Laval et McGill et de l'INRS. Valorisation Recherche Québec a collaboré à la mise en place d'Ouranos et à son financement. Les opinions et résultats présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité d'Ouranos et n'engagent pas les organismes précités.

Rédaction :

Générale : Claude DesJarlais, Alain Bourque, Réal Décoste, Claude Demers, Pierre Deschamps et Khanh-Hung Lam

Auteur principal par thème :

Le pergélisol : Michel Allard

La forêt : Michel Campagna

La production d'hydroélectricité : René Roy

L'érosion côtière : François Morneau

L'agriculture : Nancy Lease

Les écosystèmes et la biodiversité : Marie-Christine Dubé et Monique Plamondon

Le Saint-Laurent : Jean-François Cantin et Jean Morin

La gestion de l'eau : Alain N. Rousseau

La demande d'énergie : Daniel Paré

Le transport : Nathalie Noël

La santé : Pierre Gosselin

Le tourisme : Claude DesJarlais

Les événements climatiques extrêmes : Charles Lin

Coordination : Claude DesJarlais

Révision : Christopher Bryant, Daniel Caya, Georges Drapeau, Roxane Fraser, Philippe Gachon, Jeanne St-Gelais, Luc Vescovi et Michel Slivitsky

Nous les êtres humains, partageons avec les autres êtres vivants, une planète tellurique tournoyant autour d'une étoile, logée au sein d'une des innombrables galaxies de l'univers. Sans l'énergie du soleil, source de toute vie ici-bas, le climat de notre Terre serait glacé et le ciel serait une nuit sans fin. Des processus fragiles et complexes maintenaient depuis quelques millénaires un équilibre climatique confortable. Celui-ci a permis un niveau de développement dont profite seulement une partie de l'humanité et auquel aspire la majorité.

Or nous découvrons subitement que la trajectoire climatique de notre seule planète est déterminée par nos valeurs, nos choix technologiques et nos comportements économiques. Des certitudes prises pour acquises, en ce bas monde, deviendront vite caduques et seront modifiées en raison de l'amplitude des changements climatiques, déjà en marche et à venir. « Avant de songer au bonheur, à la qualité de leur vie et à la préservation de la beauté du monde, les êtres humains doivent satisfaire deux besoins vitaux, au sens propre du terme: se nourrir et s'adapter à leurs conditions environnementales. »¹

Ouranos, dieu de la mythologie grecque, personnifiait le ciel en tant qu'élément fécond. Ce mythe servait de modèle pour représenter son influence sur les humains et son interaction avec la terre. Aujourd'hui, c'est le nom d'un consortium, sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques, qui réunit une équipe de plus de 250 chercheur(e)s et professionnel(le)s originaires de plusieurs institutions et horizons scientifiques. Son mandat consiste à fournir un savoir précis, prospectif et fiable à ceux et celles qui ont le devoir de prévoir et prévenir.

Le document qui suit dresse un portrait robot de l'état actuel des quelques connaissances et des multiples ignorances relatives aux influences du climat et à ses changements possibles sur le Québec. Le langage scientifique a été mis de côté, autant que faire se peut, de façon à formuler simplement les réponses aujourd'hui disponibles et les questions qui vont devoir être documentées davantage.

Je remercie tous ceux et celles qui ont contribué à la production de ce document. Nous leur sommes redevables d'avoir mis cœur et talent à l'ouvrage afin de réunir les éléments d'un savoir indispensable à l'adoption de comportements féconds pour nous-mêmes et nos enfants.

Bonne lecture et sages réflexions.



Georges Beauchemin
Président du conseil d'administration d'Ouranos

1 Pascal Acot : « Histoire du Climat » Éditions Perrin 2003

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 :	
Science du climat – Une augmentation inévitable des températures	3
Une ascension rapide	3
L’augmentation des concentrations de GES	4
Des émissions en hausse	6
L’augmentation des températures	9
CHAPITRE 2 :	
Impacts et stratégies d’adaptation – Une approche par régions	13
Le territoire	13
La population	15
L’économie	16
Les régions du point de vue des changements climatiques	17
L’Arctique québécois	18
Le pergélisol	18
La région Ressources	22
La forêt	22
La production d’hydroélectricité	25
La région Maritime	29
L’érosion côtière	29
La région Sud du Québec	32
L’agriculture	32
Les écosystèmes et la biodiversité	35
Le Saint-Laurent	38
La gestion de l’eau	43
La demande d’énergie	46
Le transport	48
La santé	51
Le tourisme	53
Les événements climatiques extrêmes et la variabilité naturelle	55
SOMMAIRE ET CONCLUSION	59
Des émissions en hausse	59
Une augmentation inévitable des températures	60
Les impacts par régions	60
L’adaptation nécessaire	66
Une solution globale	67
Le consortium Ouranos	68
DÉFINITIONS	70
OUVRAGES DE RÉFÉRENCE	74
LISTE DES FIGURES	82

INTRODUCTION

Le consortium OURANOS est né de la nécessité de mieux connaître et de mieux comprendre les phénomènes climatiques qui toucheront le territoire du Québec au cours des prochaines décennies. À cette fin, la programmation de recherche du consortium a été regroupée en deux grandes thématiques : *Science du climat et de l'hydrologie* et *Impacts et stratégies d'adaptation*.

Les recherches sur la *Science du climat et de l'hydrologie* visent à mieux comprendre les déterminants des nombreux aspects du climat et leur évolution dans le temps, qu'il s'agisse de température, de gel et de dégel ou de précipitations sous forme de pluie, de neige et de verglas, ou encore de vent. L'analyse des données historiques, l'étude statistique de leur variabilité ainsi que la mise au point de modèles climatiques serviront à produire des scénarios climatiques. Sans une bonne connaissance de la science du climat qui soutient l'analyse des impacts, il n'est pas possible de quantifier et de préciser les stratégies d'adaptation. Ceci justifie donc les efforts majeurs de recherche sur la science du climat et de l'hydrologie qui y sont consacrés à Ouranos. Toutefois, le présent document se limite à une description des impacts appréhendés et ne porte sur les connaissances en science du climat que dans la mesure où des explications sont requises pour clarifier l'analyse des impacts.

Pour leur part, les recherches sur les *Impacts et stratégies d'adaptation* ont pour principal objectif d'aider à l'élaboration de stratégies d'adaptation aux changements climatiques qui affecteront le Québec au cours du XXI^e siècle. L'information ainsi rassemblée est destinée à soutenir les processus de décision des partenaires du consortium, dont les activités sur le territoire du Québec pourraient être touchées par des conditions climatiques inédites susceptibles d'agir, positivement ou négativement, sur un environnement naturel et humain, somme toute assez stable depuis des centaines d'années.

Avant de disposer de cette riche moisson de faits et de données diverses, qui servira à apprécier plus justement les changements climatiques que pourrait induire un possible réchauffement de l'hémisphère Nord, il est apparu tout à fait logique de réaliser un premier document d'intérêt général qui constitue, en quelque sorte, le portrait de la situation actuelle en matière de changements climatiques pour le territoire du Québec. D'où le présent ouvrage intitulé *S'adapter aux changements climatiques*, articulé autour des axes suivants :

- l'évolution du climat,
- le territoire du Québec et ses régions pour fins d'étude,
- les impacts sectoriels appréhendés.

Le chapitre 1 porte sur l'analyse des changements climatiques observés dans l'hémisphère Nord au cours des cents dernières années et leurs causes. Les éléments rassemblés ici tendent à indiquer que la hausse des températures est un phénomène bel et bien engagé et qu'il devient impératif d'en saisir plus finement les effets sur nos milieux naturels et humains. Ce chapitre dresse aussi un portrait global de ce à quoi on peut s'attendre sur le plan climatique au cours des cents prochaines années. De plus, il présente les scénarios d'évolution de climat pour le Québec pour cette même période, tirés des prévisions élaborées à l'aide des principaux modèles climatiques généraux.

Le chapitre 2 présente le territoire du Québec dans certains de ses aspects utiles à la compréhension des phénomènes climatiques en cours et instaure un cadre d'analyse fondé sur le découpage de ce territoire en quatre régions d'études. Ces régions sont : l'Arctique québécois, la région Ressources, la région Maritime, la région Sud du Québec.

Pour chacune de ces régions, on y traite des éléments les plus susceptibles de subir des chocs d'ampleur variable en fonction de l'évolution du climat. Ces éléments sont le pergélisol, la forêt, l'hydroélectricité, l'érosion côtière, les écosystèmes québécois, le Saint-Laurent ainsi que des activités humaines plus spécifiques à l'occupation du territoire québécois tels la gestion de l'eau, l'agriculture, la demande d'énergie, le transport, la santé humaine et le tourisme.

Toutes les parties de cette section s'organisent autour des trois pôles suivants :

- une description sommaire de la situation,
- les impacts appréhendés directs et indirects,
- les stratégies d'adaptation potentielles et les études à réaliser.

Le présent document propose une vue synthétique aussi complète et concise que possible des principaux phénomènes climatiques à l'œuvre dans l'hémisphère Nord et de leurs effets sur le territoire du Québec. Seule une analyse plus fine sur une base tant spatiale que temporelle des diverses manifestations des changements climatiques permettra² d'évaluer correctement les enjeux auxquels auront à faire face les générations actuelles et futures. Le travail d'Ouranos vise précisément à répondre à ce besoin de connaissance tant des phénomènes climatiques eux-mêmes que de leurs impacts.

2 Pour plus d'information sur Ouranos et les quatorze programmes d'études, voir son site Internet : www.ouranos.ca.



1

Science du climat

Une augmentation inévitable des températures

CHAPITRE 1

Science du climat – Une augmentation inévitable des températures

La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques adoptée en 1992 reconnaissait l'importance des émissions de gaz à effet de serre (GES³) sur les changements climatiques. Elle indiquait également la nécessité de stabiliser les concentrations de GES dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation dangereuse du système climatique par l'homme de façon à assurer un développement durable⁴. Enfin, elle soulignait l'importance de développer les moyens de s'adapter aux changements climatiques en cours, estimant que ceux-ci allaient inévitablement s'accroître au cours des ans.

CONVENTION-CADRE DES NATIONS UNIES SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

ARTICLE 2

L'objectif ultime de la présente Convention et de tous instruments juridiques connexes que la Conférence des Parties pourrait adopter est de stabiliser, conformément aux dispositions pertinentes de la Convention, les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Il conviendra d'atteindre ce niveau dans un délai suffisant pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement aux changements climatiques, que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique puisse se poursuivre d'une manière durable.

UNE ASCENSION RAPIDE

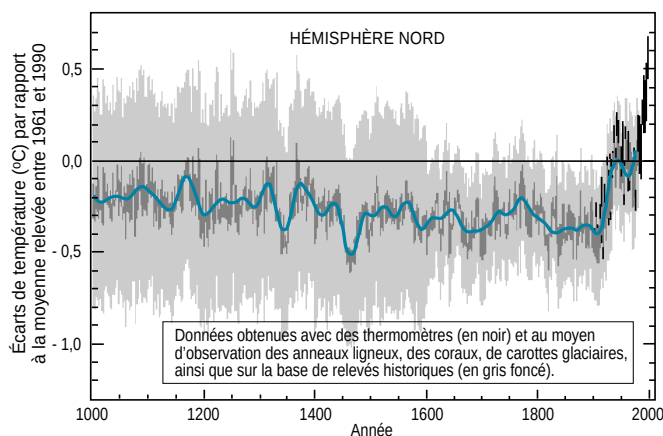
Entre 1961 et 2000, la moyenne des températures observées dans l'hémisphère Nord se situait nettement au-dessus des températures enregistrées au cours du dernier millénaire. Comme le montre la figure 1, cette période se démarque très nettement par rapport à la tendance des derniers siècles qui indiquait un léger refroidissement de quelques centièmes de degrés Celsius.

À la lumière de ces données, le climat de l'hémisphère Nord se serait réchauffé en moyenne de près de 0,6 à $\pm 0,2$ °C depuis le début du XX^e siècle. Contrairement à certains épisodes de réchauffement antérieurs au cours des mille dernières années, il s'agit là d'un phénomène observable à l'échelle de toute la planète. Depuis que l'on effectue des relevés instrumentés de température, la décennie 1990 s'est révélée la plus chaude de toutes, 1998 étant apparue parmi celle-ci comme l'année la plus chaude. Par ailleurs, les températures minimales (généralement de nuit) auraient augmenté en moyenne deux fois plus que les températures maximales (en général celles de jour), ce qui a un impact direct sur les amplitudes thermiques quotidiennes, mensuelles et saisonnières et sur les alternances gel/dégel.

Les précipitations auraient augmenté en moyenne sur l'hémisphère Nord, avec des variations spatiales importantes, certaines régions ayant plutôt connu des réductions. Sur les terres de moyenne et de haute latitude de l'hémisphère Nord, on aurait assisté à une augmentation de l'ordre de 5 à 10 %, avec une légère augmentation des précipitations intenses.

Figure 1

Variation de la température à la surface de la terre dans l'hémisphère Nord entre les années 1000 et 2000 (GIEC, 2001)



En ce qui concerne la couverture de neige, elle aurait diminué de 10 % depuis la fin des années 1960, alors que la durée de la couverture de glace des lacs et des rivières aurait été réduite d'environ deux semaines depuis le début du XX^e siècle. Quant à la couverture de glace marine de l'hémisphère Nord, elle aurait diminué de 10 à 15 % depuis les années 1950, l'épaisseur de la glace arctique diminuant de 40 % en été. Le pergélisol aurait également connu un réchauffement de 2 à 4 °C. Enfin, le niveau des mers aurait monté de 0,1 à 0,2 mètre au cours du XX^e siècle, soit à un rythme environ dix fois plus élevé qu'au cours des millénaires précédents. Cette augmentation est essentiellement liée à la dilatation thermique des océans dont la température de surface a augmenté d'environ 0,5 °C depuis 1860.

3 Les gaz à effet de serre visés par le protocole sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'oxyde nitreux (N₂O), les hydrofluorocarbones (HFC), les hydrocarbures perfluorés (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF₆)

4 Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, Organisation des Nations Unies, 1992, article 2.

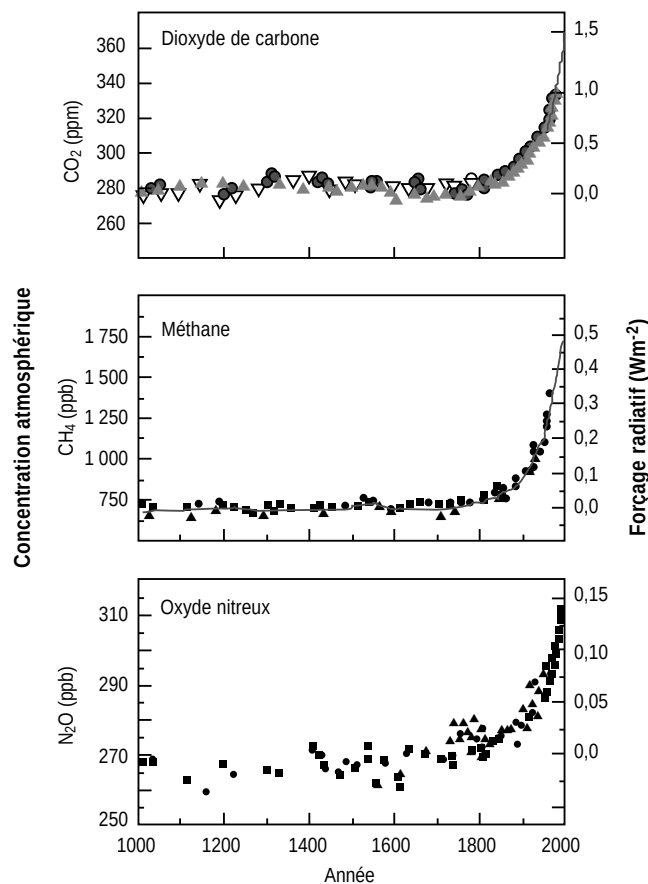
L'AUGMENTATION DES CONCENTRATIONS DE GES

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)⁵ attribue, en grande partie, cette hausse des températures à l'effet de serre accru, créé par l'augmentation des concentrations des GES émis par l'homme dans l'atmosphère depuis le début de la révolution industrielle. Bien que la vapeur d'eau continue d'être le principal gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre, son effet est amplifié par l'ajout des contributions aux autres gaz provenant des activités humaines. La figure 2 montre clairement l'ampleur des augmentations de concentration de dioxyde de carbone, de méthane et d'oxydes nitreux pour la période de l'an 1000 à 2000. Entre 1750 et aujourd'hui, la concentration du CO₂ a augmenté de 30 % en raison de l'utilisation de combustibles fossiles⁶, cette concentration passant durant cette période de 280 à 367 ppm⁷. Les concentrations actuelles de CO₂ n'ont jamais été aussi élevées depuis 420 000 ans et le taux actuel d'augmentation des concentrations, relatif aux émissions, est sans précédent depuis 20 000 ans.

Soixante-quinze pour cent de la croissance des émissions est attribuable à l'utilisation de combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel), la portion restante étant le résultat de changements survenus dans l'utilisation des sols, par exemple à la suite d'une déforestation. Quoique variable d'une année à l'autre, environ la moitié des émissions anthropiques de CO₂ est absorbée par les océans et les zones terrestres, l'autre moitié s'accumulant dans l'atmosphère terrestre. On observe une importante variation du taux de croissance de la concentration de CO₂ d'une année à l'autre en raison de l'impact d'événements climatiques, tels que El Niño, sur l'absorption du gaz par les forêts et les océans.

Figure 2

Évolution des concentrations de CO₂, de CH₄ et de N₂O entre les années 1000 et 2000 (GIEC, 2001)



⁵ Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat a été établi conjointement en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE).

⁶ Les changements dans la composition atmosphérique des isotopes du CO₂ permettent d'évaluer clairement la part croissante des combustibles fossiles dans l'augmentation de ce gaz dans l'atmosphère, chacune des sources d'émissions étant caractérisée par une composition en isotopes particulière.

⁷ ppm : partie par million ou encore le nombre de molécules d'un gaz par million de molécules d'air sec.

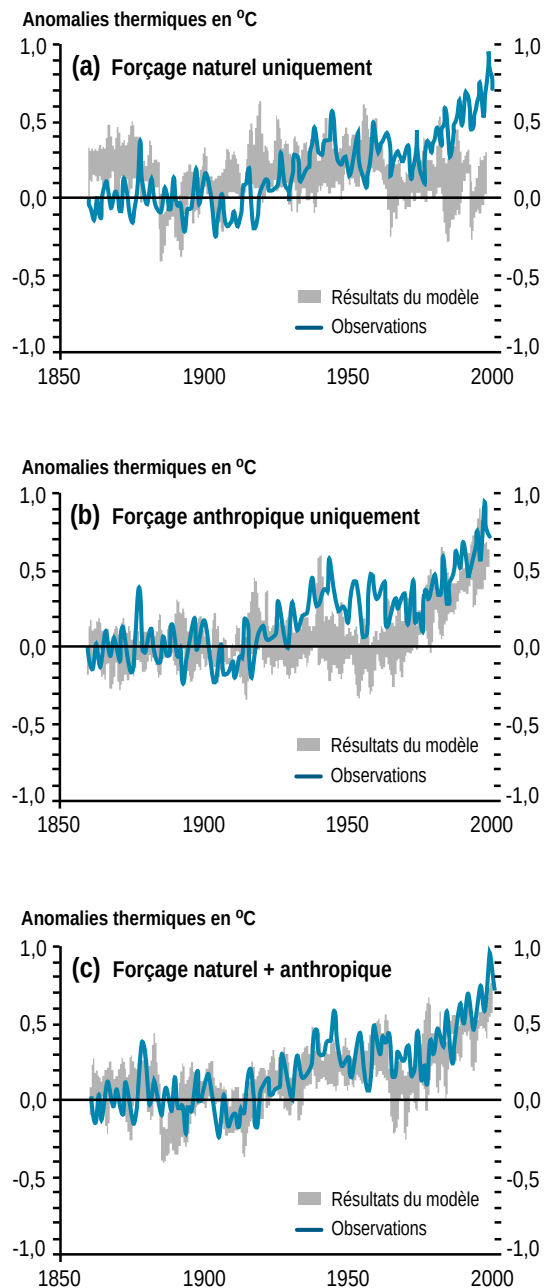
Les GES, naturellement présents dans l'atmosphère, contribuent à retenir la chaleur et maintiennent ainsi des conditions propices à la vie sur Terre. L'augmentation de leur concentration conduit toutefois à un forçage climatique que l'on peut définir comme une perturbation du bilan énergétique terrestre. En effet, la Terre reçoit son énergie essentiellement du rayonnement solaire, soit environ 340 W/m^2 (au sommet de l'atmosphère) en moyenne dans le temps et l'espace. Elle en retourne directement environ un tiers vers l'espace par la réflexion des nuages, de l'atmosphère et du sol. L'autre partie est absorbée par l'atmosphère et redirigée vers l'espace sous forme de rayonnement infrarouge. L'augmentation des concentrations de GES a pour conséquence de maintenir au voisinage de la Terre une part un peu plus importante de cette énergie sous forme d'infrarouge. Cela occasionne un léger déséquilibre à la hausse ou forçage positif du bilan énergétique terrestre de quelques watts par mètre carré (ou mégawatts par kilomètre carré).

De nombreux autres facteurs influencent le climat en dehors des GES visés par la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et le Protocole de Kyoto. En effet, les aérosols troposphériques, les changements d'utilisation des sols, les aérosols provenant des éruptions volcaniques ainsi que la variation de la radiation solaire et de la concentration d'ozone ont aussi une influence sur le climat. Les modèles climatiques prennent en compte la plupart de ces facteurs dans leur simulation de l'évolution du climat à travers le temps et l'espace.

On voit au graphique **a** de la figure 3 que l'évolution des températures modélisées, en ne tenant compte que des facteurs naturels de forçage radiatif, est de beaucoup inférieure aux observations les plus récentes. Par contre, le graphique **b** où la modélisation ne considère que l'augmentation des gaz à effet de serre due à l'action de l'homme ne réussit pas non plus à reproduire la variation des températures observées. Cependant, en tenant compte à la fois des variations des facteurs de forçage radiatif naturels et humains, les modèles peuvent reproduire beaucoup plus correctement les variations observées comme le montre le graphique **c**.

Figure 3

Variations des températures observées et modélisées avec contributions naturelles et anthropogéniques (GIEC, 2001)



DES ÉMISSIONS EN HAUSSE

La principale source d'émissions de GES est liée à l'usage des combustibles fossiles (gaz naturel, charbon et pétrole). Or, l'augmentation de l'usage des combustibles fossiles dépend dans une très large mesure (comme l'énonce l'identité ci-dessous (Kaya, 1990)) de la croissance des populations et de la croissance économique qui se traduisent presque inévitablement par une croissance de la consommation d'énergie. Cette demande d'énergie touche à la fois la demande d'énergie électrique et thermique et, selon les ressources naturelles disponibles, celle-ci entraîne une augmentation de la production et de la consommation d'énergies renouvelables et fossiles.

Émissions de CO₂

= PIB X Intensité énergétique X Intensité en carbone

= [(PIB/population) X population] X (énergie/PIB) X (émissions de CO₂/énergie)

Même si l'on peut établir un éventail de prévisions démographiques relativement précis, l'incertitude touchant à la fois la croissance économique et l'évolution de l'intensité en carbone demeure très élevée. En conséquence, l'éventail des prévisions sur l'évolution des émissions de CO₂ est lui-même très large. Ce qui est vrai à l'échelle mondiale l'est encore plus à une échelle régionale.

Dans les pays développés qui connaissent un ralentissement marqué de leur croissance démographique, la croissance

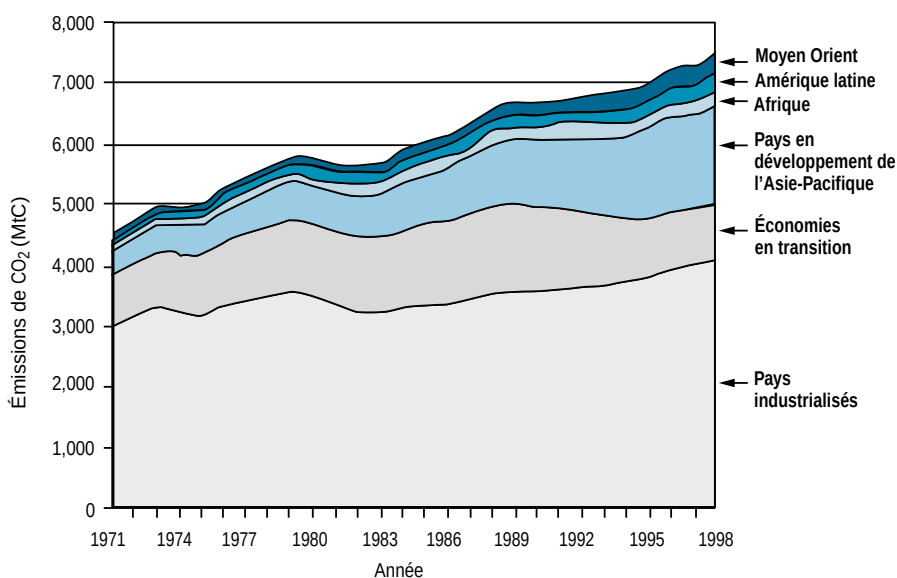
des émissions est essentiellement liée à la croissance de la consommation d'énergie par habitant tant pour les usages spécifiques de l'électricité que pour les transports. Dans les pays en développement, on observe à la fois une forte croissance démographique et une élévation des niveaux de vie, ce qui a pour effet d'induire une expansion considérable de la consommation d'énergie et des émissions de GES.

L'importance croissante des émissions de GES des pays en développement et particulièrement des pays de l'Asie et du Pacifique devra être prise en compte. Comme le montre la figure 4, la part des pays membres de l'OCDE⁸ et des économies en transition dans l'évolution des émissions de GES diminue, tandis que celle des pays de la région Asie-Océanie augmente. Or, ces pays dont le poids démographique est considérable devraient vraisemblablement réaliser, au cours des prochaines décennies, un rattrapage important sur le plan du niveau de vie.

Afin d'évaluer la progression attendue des émissions de GES, le GIEC a modélisé un nombre restreint de scénarios d'émissions de GES d'ici la fin du siècle en fonction de différentes hypothèses de croissance de population, de croissance économique, de développement technologique et d'utilisation des énergies fossiles. Le détail de ces scénarios est présenté dans le *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES) publié en 2000 par le Groupe de travail III du GIEC.

Figure 4

Évolution des émissions de GES par groupes de pays de 1971 à 1998 (GIEC, 2001)



8 OCDE : Organisation de coopération et de développement économiques.

LES SCÉNARIOS D'ÉMISSIONS DU RAPPORT SPÉCIAL SUR LES SCÉNARIOS D'ÉMISSIONS

A1. Les scénarios A1 sont fondés sur :

- une croissance économique très rapide ;
- une croissance des populations qui atteint un sommet au milieu du XX^e siècle et décline par la suite ;
- une pénétration rapide de nouvelles technologies énergétiques plus efficaces.

On s'attend à une plus grande convergence entre les régions du globe avec des échanges accrus et une réduction des écarts de revenus. On distingue au sein de ce groupe trois scénarios en fonction des sources d'approvisionnement énergétique en cause :

- combustibles fossiles : scénario A1FI,
- énergies non fossiles : scénario A1T,
- amélioration technologique touchant toutes les sources d'approvisionnement : scénario A1B.

A2. Les scénarios A2 envisagent un monde où la convergence est plus lente avec des taux de fécondité qui demeurent élevés dans certaines régions et une population mondiale qui continue de s'accroître tout au long de l'horizon de prévisions. La croissance économique et technologique y est plus hétérogène et plus lente.

B1. Les scénarios B1 proposent une évolution semblable à celle des scénarios A1, tout en accordant une place plus importante à une économie de services et d'information. Ce type d'évolution est accompagné d'une réduction de la consommation des matières premières, de l'introduction de technologies propres utilisant plus efficacement les ressources.

B2. Les scénarios B2, comme les scénarios A2, posent l'hypothèse d'une croissance continue des populations mais à un rythme inférieur. Le développement économique y est moyen et les changements technologiques sont plus variés, de façon à mieux répondre aux situations locales et régionales.

Aucun de ces scénarios ne prend en compte spécifiquement la mise en œuvre du Protocole de Kyoto ou d'autres initiatives découlant de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.

Les graphiques **a** et **b** de la figure 5 présentent les émissions de CO₂ et les niveaux de concentrations qui en découlent. Le graphique **a** montre que les émissions totales de CO₂ pourraient passer de 8 Gt/an (milliards de tonnes) en 2000 à 28 Gt/an en 2100 dans le cadre du scénario A1FI, où l'essentiel de la nouvelle croissance est alimenté par des sources d'énergies fossiles. À l'inverse, un scénario optimiste comme le B1, qui compte sur une stabilisation rapide des populations et l'adoption de technologies moins émettrices de carbone, permettrait de réduire les émissions à environ 5 Gt/an en 2100.

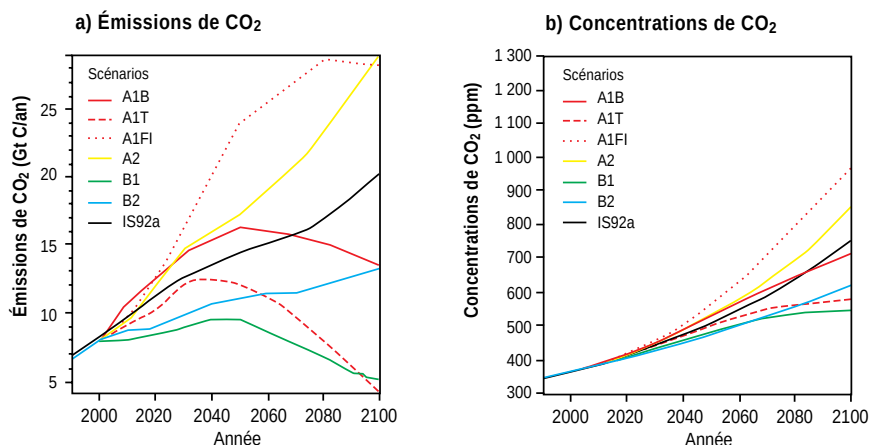
À titre indicatif, l'«International Energy Outlook 2003» de l'Energy Information Agency (EIA) du Department of Energy des États-Unis prévoit un taux de croissance annuel de 1,9 % des émissions de GES jusqu'en 2025. Un taux de croissance

annuel de 2 % sur l'horizon 2050 est compatible avec les scénarios A2 et A1B de la figure 5. À 2 % par année, les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère doubleraient d'ici 2055 et quadrupleraient vers 2100.

Le graphique **b** de la figure 5 montre que la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère continuerait, dans tous les cas, d'augmenter, puisque même un niveau de 5 Gt/an est supérieur à la capacité d'absorption de l'écosystème terrestre. Selon ces scénarios, les concentrations de CO₂ passeraient de 360 ppm en 2000 à un seuil variant de 540 à 970 ppm en 2100, soit une augmentation de l'ordre de 90 % pour le scénario le plus optimiste (B1) à 250 % (A1FI) par rapport à la concentration de référence – 280 ppm – concentration constatée lors de la période préindustrielle (avant 1850).

Figure 5

Croissance des émissions et des concentrations selon divers scénarios du GIEC (GIEC, 2001)



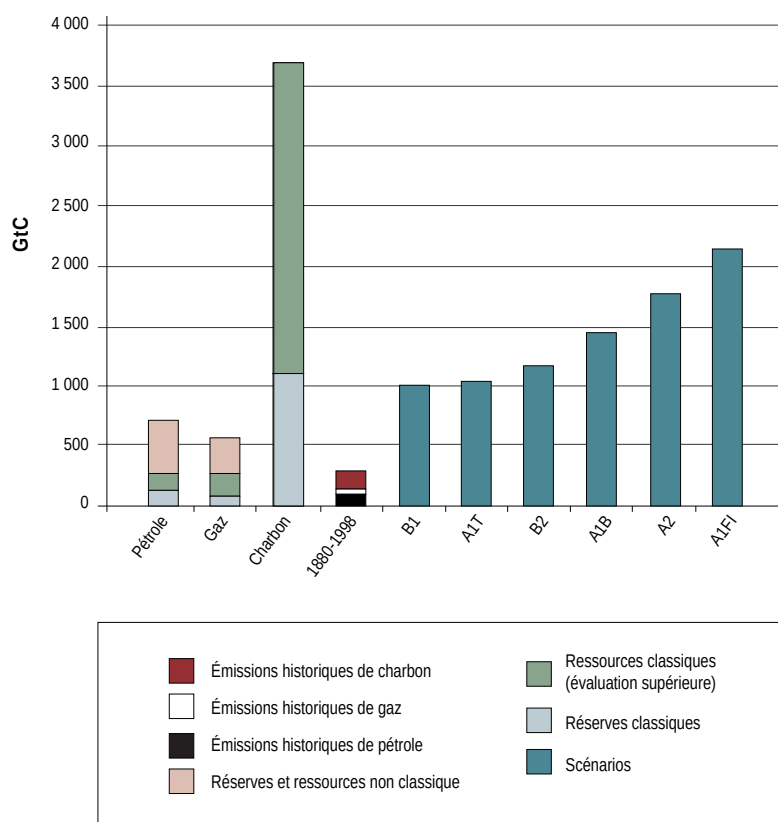
La figure 6 compare les émissions prévisibles dues à l'activité humaine au cours du prochain siècle et celles qui ont été émises depuis 1880. Quel que soit le scénario retenu, on constate que les émissions à venir dépasseraient de beaucoup le total des émissions historiques. Ce qui est tout à fait plausible, compte tenu des réserves de combustibles fossiles suffisamment abondantes pour assurer la réalisation de ces scénarios et de la forte croissance de la demande d'énergie, causée par la croissance démographique et économique mondiale telle que mentionnée précédemment.

Les scénarios du GIEC ne comprennent aucune hypothèse explicite concernant l'adoption de politiques comme le Protocole de Kyoto. Toutefois, implicitement, pour que les scénarios optimistes se réalisent, il faudra des engagements

substantiels de réduction des émissions de GES. En fait, il faudra des engagements beaucoup plus considérables que ceux du Protocole de Kyoto, qui représentent un peu plus de 5 % des émissions de 1990 des pays industrialisés et en voie de transition, et qui ne conduirait qu'à une diminution d'au plus 3 à 4 % des émissions totales. Des réductions de l'ordre de 30 à 40 % doivent être envisagées pour atteindre l'objectif minimal de limiter la concentration de CO₂ dans l'atmosphère à deux fois le niveau préindustriel à la fin de ce siècle. C'est donc des réductions de l'ordre de 10 fois celles de Kyoto qu'il faudra viser, pour éviter les régimes climatiques dangereux. De façon corollaire, il faudra également développer des scénarios d'adaptation à un climat correspondant d'ici la fin du siècle en cours, à des concentrations de CO₂ d'au moins deux fois celle de l'époque préindustrielle.

Figure 6

**Comparaison des émissions historiques et des scénarios d'émissions du GIEC
et les réserves et les ressources d'hydrocarbures
en milliards de tonnes de carbone (GtC)
(GIEC, 2001)**



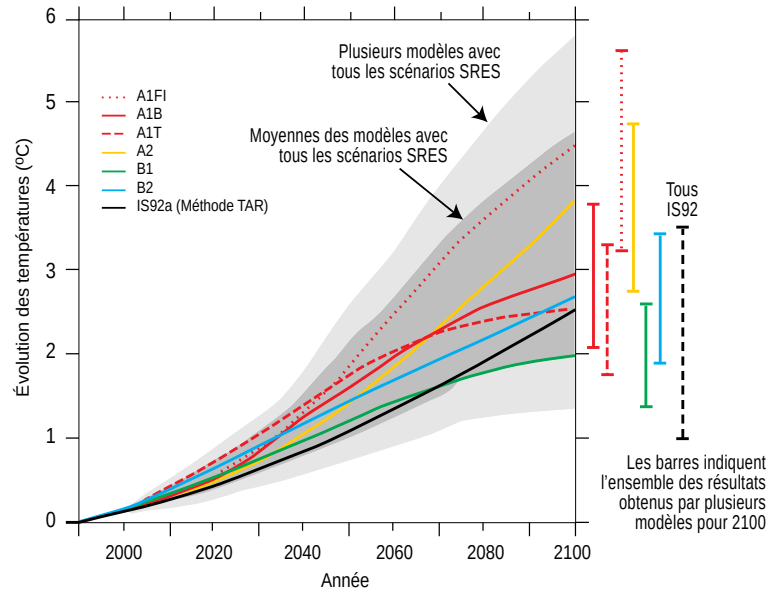
L'AUGMENTATION DES TEMPÉRATURES

Selon l'ensemble des scénarios, les températures dans le monde augmenteraient en moyenne, de 1,5 à 6 °C au cours du siècle. La figure 7 illustre l'éventail des prévisions de hausse des températures de 2000 à 2100 en fonction des scénarios du GIEC et de divers modèles généraux de simulation du climat. Sous les latitudes les plus nordiques, les hausses pourraient être supérieures d'environ 40 % à la moyenne hémisphérique. De plus, sous les latitudes nordiques moyennes et élevées, les précipitations devraient s'accroître au cours de la deuxième moitié du XXI^e siècle, accompagnées de variations annuelles plus importantes.

Pour le Québec, selon Hulme *et al.* (1999), les modèles mondiaux de climat suggèrent pour la fin du siècle un scénario moyen d'augmentation des températures en été de 2 à 3 °C dans le Sud (en dessous du 50 °N) avec des précipitations augmentant de 0 à 5 %, alors que dans le Nord (au-delà du 50 °N) la même hausse des températures conduirait à une hausse des précipitations de 5 à 10 %. En hiver, les températures seraient plus élevées de 3 à 4 °C dans le Sud avec une augmentation importante des précipitations de 10 à 20 %, tombant sous forme de pluie ou de neige, alors que dans le Nord, les températures augmenteraient de 4 à 5 °C avec des précipitations plus élevées de 10 à 25 %. Ce scénario moyen de changements climatiques est fondé sur l'utilisation de quatre scénarios d'émissions du SRES soit les scénarios B1, B2, A1B et A2 qui vont du plus optimiste au plus pessimiste, allant d'une diminution de 4 % des émissions en 2100 par rapport à l'an 2000 à une augmentation de 320 %.

Figure 7

Hausse des températures de 1990 à 2100, selon les scénarios du GIEC et divers modèles de simulation (GIEC, 2001)



La figure 8 présente l'éventail des changements de températures et de précipitations qui, selon les modèles mondiaux de climat, pourraient survenir advenant la réalisation de l'un ou l'autre des quatre scénarios d'émissions mentionnés précédemment.

Figure 8

Scénarios d'augmentation des températures et des précipitations pour le Québec pour la période 2080 à 2100 par rapport à la période 1960-1990 (Hulme *et al.*, 1999)

	SUD DU QUÉBEC			NORD DU QUÉBEC		
	Scénario optimiste	Scénario moyen	Scénario pessimiste	Scénario optimiste	Scénario moyen	Scénario pessimiste
Été (juin à août)						
Températures	+1,5°C	+2 à +3°C	+4,5 à +5°C	+1 à +1,5°C	+2 à +3°C	+4 à +4,5°C
Précipitations	0 %	0 à +5 %	0 à +10 %	0 à +5 %	+5 à +10 %	+10 à +20 %
Hiver (déc. à fév.)						
Températures	+2°C	+3 à +4°C	+6 à +7°C	+2 à +3°C	+4 à +5°C	+7 à +9°C
Précipitations	+10 %	+10 à +20 %	+25 à +35 %	+5 à +15 %	+10 à +25 %	+20 à +40 %

Théoriquement, tout changement dans la moyenne s'accompagne également de changements dans la variabilité et les extrêmes du climat. Cependant, la génération de scénarios d'extrêmes et de variabilité climatique est une tâche beaucoup plus délicate à réaliser que les changements dans les conditions moyennes. D'une part, la faible résolution horizontale des modèles globaux, de l'ordre de 400 km, limite le degré de confiance que l'on peut avoir dans la prévision des changements à l'échelle régionale, surtout en ce qui a trait aux phénomènes extrêmes fortement dominés par des effets locaux. D'autre part, les extrêmes apparaissent aux limites de la variabilité simulée par les modèles alors que ces derniers sous-estiment bien souvent la variabilité observée (Covey *et al.*, 2000).

Quoi qu'il en soit, les changements appréhendés dans les extrêmes de température mensuelle devraient être

essentiellement déterminés par des extrêmes de température chaude plus élevés et des extrêmes de température froide moins sévères qu'aujourd'hui. Quant aux extrêmes de précipitations mensuelles appréhendés, l'incertitude est plus grande que pour les températures, les résultats variant fortement entre les différents modèles. Le modèle global canadien suggère par exemple une augmentation des extrêmes de précipitations quotidiennes au Canada, d'environ 14 % des valeurs maximales sur une période de retour de 20 ans par rapport aux valeurs actuelles (Zwiers et Kharin, 1998; Kharin et Zwiers, 2000). De plus, l'augmentation des précipitations devra tenir compte de l'augmentation de l'évaporation associée aux températures plus élevées, avant d'évaluer l'impact sur les divers secteurs d'activité tels que les forêts, l'agriculture ou la production hydroélectrique.

Y A-T-IL UN RÉCHAUFFEMENT AU QUÉBEC DEPUIS UN SIÈCLE ?

La réponse n'est pas simple car le système climatique présente une grande variabilité naturelle. Cette variabilité s'exerce à la fois dans l'espace et dans le temps, allant de la variation diurne/nocturne aux variations moyennes interannuelles, décennales ou même à l'échelle du siècle.

Les études sur les tendances de température et de précipitations à l'échelle nationale réalisées par le ministère de l'Environnement du Canada au cours des dernières années (Zhang *et al.*, 2000) ont révélé que, pour la période de 1900 à 1998, la température moyenne annuelle a augmenté de 0,9 °C au sud du 60° N.

Pour le Québec dans son ensemble, on observe un réchauffement allant du début du siècle jusqu'au début des années 1940, suivi d'un léger refroidissement de 1940 au milieu des années 1970 et par la suite d'une hausse des températures assez prononcée jusqu'à aujourd'hui ce qui donne, pour toute la période, une augmentation totale de 0,6 °C.

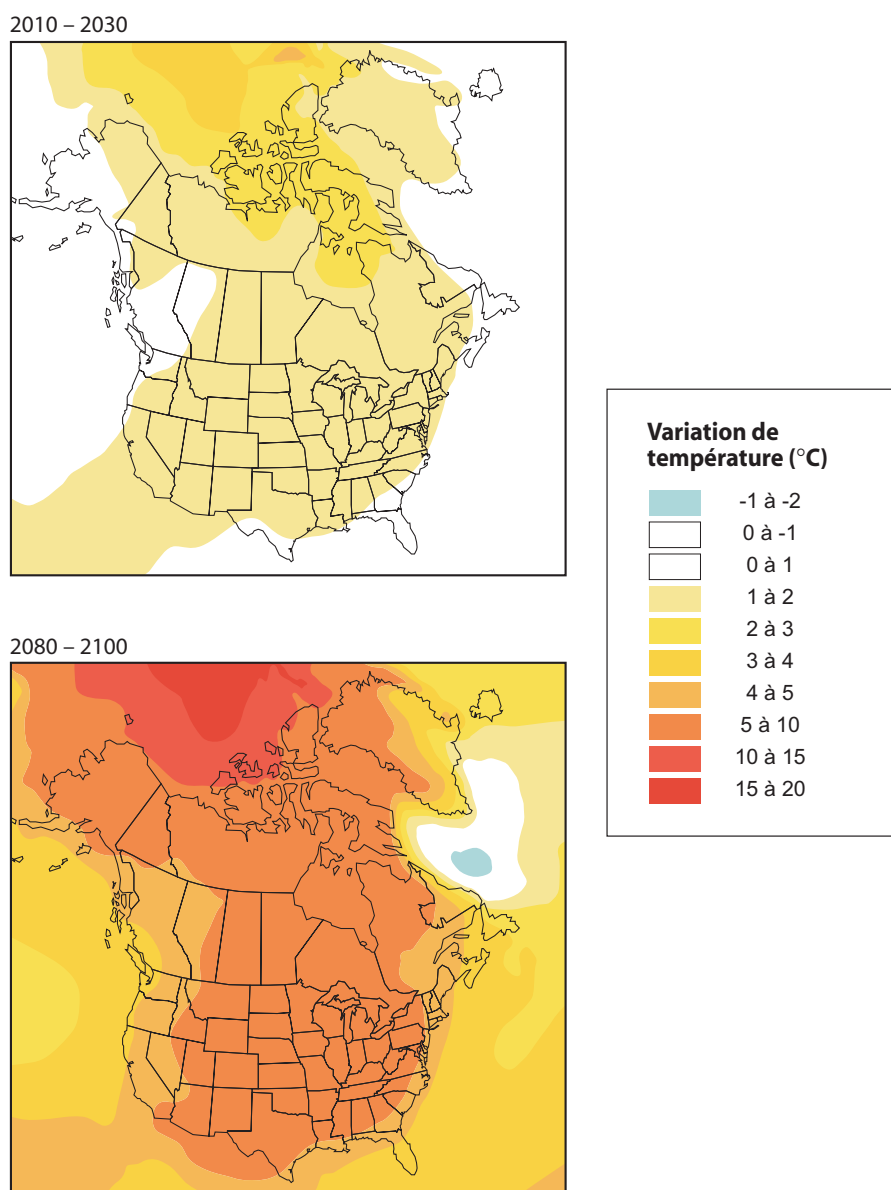
L'analyse des profils tendanciels de température indique une hausse des températures journalières maximale et minimale pour l'ensemble du Québec. Cependant, l'augmentation des minimums est beaucoup plus marquée que celle des maximums particulièrement dans le sud, ce qui entraîne une diminution de l'écart diurne de la température (EDT). L'augmentation de la température est plus importante durant la nuit que le jour. En d'autres mots, cela signifie que le Québec est devenu non pas plus chaud, mais moins froid (Henderson-Sellers, 1989 ; McGuffie et Henderson-Sellers, 1988).

La figure 9 montre les différences de températures moyennes en °C pour les hivers 2010-2030 et 2080-2100 par rapport à 1975-1995. Ces résultats sont ceux du modèle canadien de circulation générale, à partir d'un scénario de croissance des émissions de GES de 1 % par année, un des scénarios relativement conservateurs parmi ceux présentés à la figure 7 (IS92a).

Déjà, entre 2010 et 2030, des augmentations de températures de 2 à 3 °C sont prévues pour l'extrême Nord du Québec. À l'horizon de la période 2080-2100, la région de la baie d'Hudson et tout le Nord (régions arctique et sub-arctique) connaîtraient des modifications de températures variant de 5 à 10 °C, ce qui est considérable.

Figure 9

**Différences de températures moyennes en °C
pour les périodes 2010-2030 et 2080-2100 par rapport à 1975-1995**
(Service Météorologique du Canada, Environnement Canada, 2000)





Impacts et stratégies d'adaptation

Une approche par régions

CHAPITRE 2

Impacts et stratégies d'adaptation – Une approche par régions

Les impacts des changements climatiques, certains étant favorables et d'autres défavorables, sont multiples et touchent à la fois l'environnement naturel et humain. Si, à l'échelle du globe, les changements climatiques auront des impacts sérieux et irréversibles, notamment sur les systèmes naturels et aussi sur plusieurs habitats humains et activités de production, leur distribution entre les régions du globe risque d'être très inégale.

En effet, les augmentations de température seront plus élevées pour les régions nordiques alors que les basses latitudes risquent de souffrir de sécheresses plus aiguës. De même, les économies développées devraient être plus aptes à réagir efficacement aux changements de température que les autres. Les impacts seront aussi très différents selon que les changements de température se limitent à quelques degrés ou qu'ils sont plus importants ; et ce qui pourrait être avantageux dans un premier temps risque fort de ne plus l'être par la suite. Dans tous les cas, le degré et l'efficacité de l'adaptation, planifiée ou spontanée, auront une influence déterminante sur le coût ultime des changements climatiques. À l'aide d'une bonne planification, les économies modernes qui ont appris à

s'ajuster à des changements commerciaux et technologiques de grande ampleur devraient être en mesure de réduire considérablement les coûts associés aux changements climatiques et même d'en exploiter les avantages.

Une évaluation précise des conséquences des changements climatiques exige une analyse détaillée à l'échelle régionale, qui tient compte à la fois de la situation géographique propre à chaque environnement naturel ainsi que des aspects économiques et démographiques. De plus, l'élaboration de stratégies d'adaptation doit se fonder sur une connaissance précise des particularités de chaque régime climatique et sur l'évolution de ce dernier dans le temps.

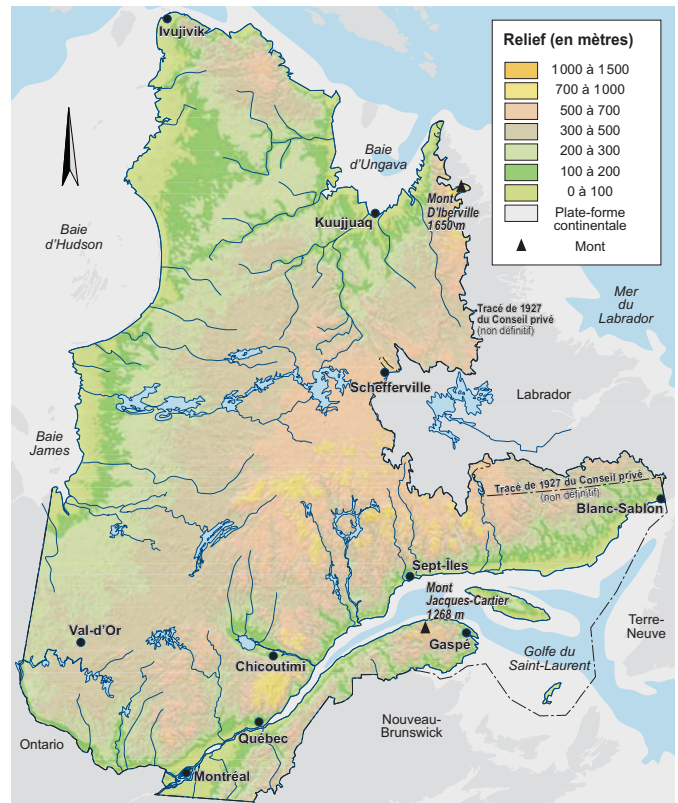
LE TERRITOIRE

D'une superficie d'environ 1 700 000 km², le Québec est immense. Il pourrait contenir trois fois la France ou cinq fois le Japon. Du sud au nord, le Québec s'étend entre 45° et 62° de latitude nord (environ 2 000 km) et, d'est en ouest, entre 57° et 79° de longitude ouest (environ 1 500 km). La densité de sa population est très faible – 4,7 habitants par kilomètre carré⁹. Les nappes d'eau douce de surface recouvrent 10 % du Québec et représentent plus d'un million de lacs et de cours d'eau. Le plus important, le Saint-Laurent, traverse le Québec d'ouest en est sur plus de 1 000 km avant de se jeter dans l'Atlantique.

Le Québec se subdivise en trois grandes régions géologiques associées à trois types de reliefs. Le plateau laurentien occupe près de 95 % de la superficie du Québec et fait partie du Bouclier canadien – l'une des plus anciennes formations géologiques du monde, formée surtout de roche granitique. Il comprend des montagnes de faible altitude aux sommets arrondis, couvertes de belles forêts et de nombreux lacs. La seconde formation est constituée par la plaine des basses terres du Saint-Laurent, qui bordent le fleuve du même nom. Les sols de la plaine du Saint-Laurent sont argileux. Les activités agricoles y sont fortement concentrées. Au sud enfin, s'élèvent les Appalaches, une chaîne de montagnes aux sommets allongés et boisés, entrecoupée de vallées. En général, le relief du territoire québécois est peu accentué, marqué de rares sommets dépassant les 900 m.

Figure 10

Les reliefs (Ressources naturelles Canada, 2002)



⁹ Ce chiffre est toutefois peu significatif en raison de l'immensité du territoire et du fait que le Nord-du-Québec est presque inhabité, la grande majorité de la population vivant près des rives du Saint-Laurent.

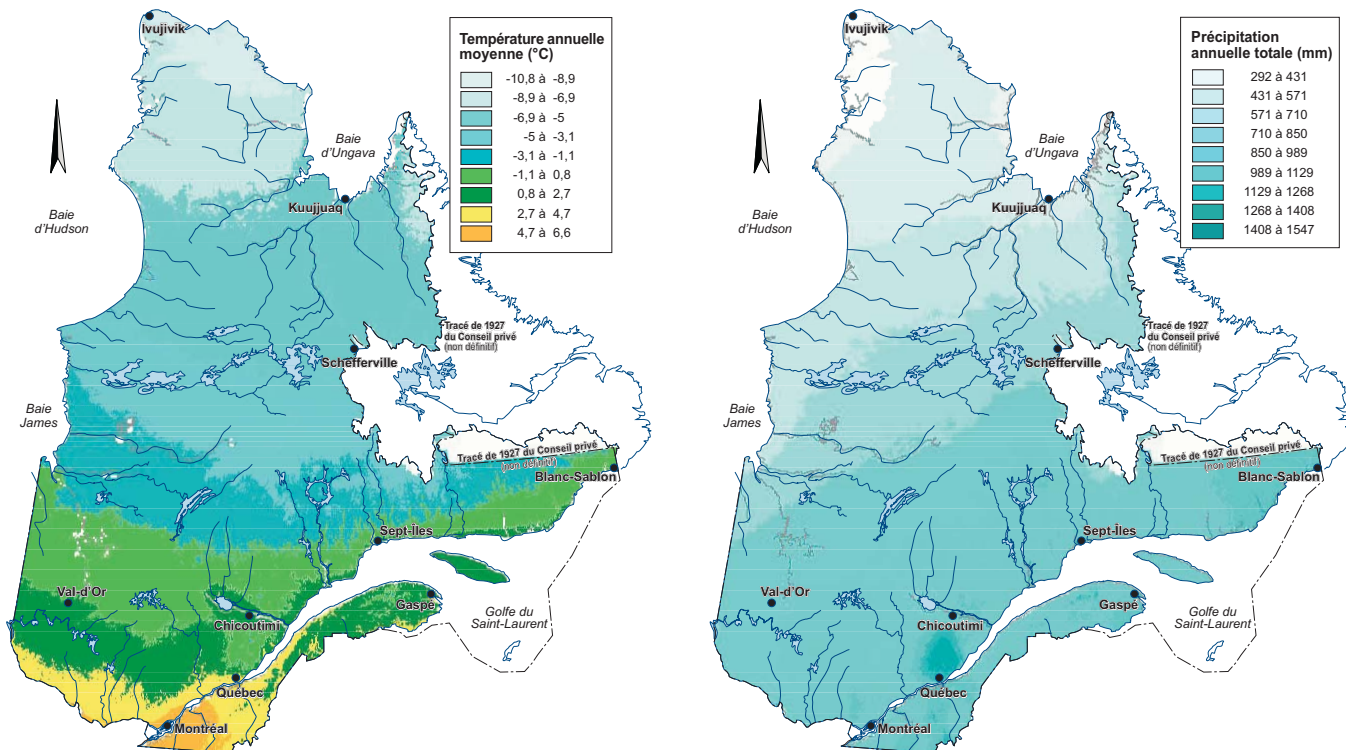


Sur un territoire aussi vaste, il n'est pas étonnant d'enregistrer des écarts importants de température et de précipitations. La température moyenne d'été se situe entre 5 et 20 °C, alors que celle de l'hiver, qui dure de cinq à huit mois selon les régions, varie de - 25 à - 10 °C. Selon les années, les précipitations annuelles totales (neige et pluie) varient de 300 à 900 mm et même jusqu'à 1500 mm en certains endroits plus montagneux. Au sud de 50° de latitude Nord, le climat du type continental humide est tempéré. Quatre saisons s'y succèdent : un printemps doux, un été souvent chaud, un automne coloré

mais parfois frisquet, ainsi qu'un hiver blanc et froid que les Québécois ont appris à apprivoiser. Les zones habitées avoisinent la forêt de feuillus et la forêt mixte. Dans la partie sub-arctique, les hivers sont plus froids et les étés plus courts et plus frais alors que les précipitations sont moins abondantes ; la végétation y est dominée par une forêt de conifères appelée forêt boréale ou *taïga*, dont la densité va en diminuant. À l'extrême nord, le territoire connaît les rigueurs d'un climat arctique et une végétation de toundra. Enfin, dans la région du golfe du Saint-Laurent, le climat est maritime.

Figure 11

Les températures et précipitations moyennes annuelles au Québec de 1966 à 1996
(MENV, 1997)



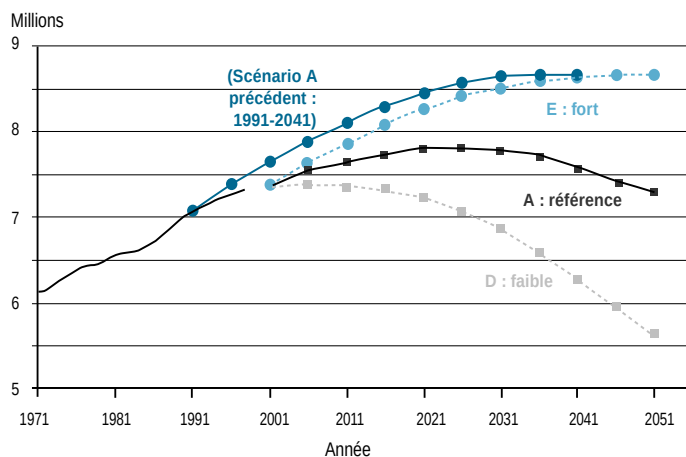
LA POPULATION

La population du Québec est dispersée très inégalement, la très grande majorité (80 %) vivant dans la plaine du Saint-Laurent. Le reste du territoire dont l'économie est davantage axée sur l'exploitation des ressources naturelles abrite l'autre partie de la population, la région arctique regroupant pour sa part une dizaine de milliers de personnes.

Selon le scénario de référence du Bureau de la statistique du Québec (1999), la population du Québec (7,4 millions d'individus en 2001) passerait à 7,8 millions en 2026 et à 7,3 millions en 2051. Les scénarios faible et fort envisagent respectivement pour 2051 une diminution de la population à 5,6 millions de personnes ou une légère augmentation à 8,6 millions (à partir des hypothèses retenues pour le taux de fécondité et le solde migratoire).

Figure 12

Évolution de la population 1991-2051 (Bureau de la Statistique du Québec, 2000)



Si, dans le scénario de référence, le niveau actuel de la population demeure relativement stable au cours des prochaines décennies et commence à décliner vers 2026, sa composition et sa répartition seront sensiblement différentes. Les scénarios du Bureau de la statistique du Québec montrent une distribution régionale fort contrastée. Douze des dix-sept régions administratives du Québec entameront une décroissance d'ici 2026. À plus long terme, les diminutions de populations y seront encore plus importantes, allant de - 16 à - 32 %. Durant la même période, la population de la région de Montréal augmenterait de près de 450 000 personnes (+ 13 %), ces personnes s'installant principalement dans les couronnes nord et sud. L'Outaouais profiterait aussi d'une forte croissance démographique, sa population atteignant 364 000 habitants en 2041 (+ 13 %). Notons également en raison de sa problématique particulière, l'Arctique québécois, qui connaîtrait entre 2001 et 2021 un accroissement de population de 10 000 à 13 000 personnes, soit d'environ 30 %.

Les variations de la population par grand groupe d'âge seraient encore plus prononcées que les variations prévues des populations totales des régions. Lorsqu'on considère le rapport entre les personnes âgées de plus de 65 ans et les plus jeunes, le portrait démographique du Québec se trouverait complètement transformé. En 2051, il y aurait plus de 2 millions de Québécois âgés de 65 ans et plus. La répartition régionale des personnes âgées de 65 ans et plus montre que leur poids démographique dépasserait presque partout les 20 % en 2026, sauf dans le Nord-du-Québec. En 1996, la région la plus vieille sur le plan démographique, la Mauricie, en comptait moins de 15 %. À l'horizon 2026, seule une zone en forme de croissant, centrée sur le Montréal métropolitain (s'étirant de l'Outaouais au Centre-du-Québec), présenterait une certaine vigueur démographique.

Vieillesse démographique, croissance des populations métropolitaines en perte de vitesse et dépopulation dans les régions éloignées des grands centres sont les trois conclusions qui émergent des perspectives démographiques.





L'économie québécoise est une économie diversifiée largement tournée vers l'extérieur et qui assure à sa population un très haut niveau de vie. Au total, en 2001, le produit intérieur brut du Québec dépassait 230 milliards de dollars, en dollars courants. Au cours des dernières décennies, tout en poursuivant sa marche vers une plus forte tertiarisation, une part croissante de l'économie québécoise s'est construite sur l'émergence des secteurs de production dits des nouvelles technologies (biotechnologies, aéronautique et technologies de l'information).

La sensibilité et la vulnérabilité de l'économie québécoise aux changements climatiques est fonction de l'importance des secteurs qui risquent d'être les plus affectés, soit positivement, soit négativement par les changements de température et de précipitations. Au nombre de ceux-ci, on compte bien sûr les industries des forêts, de l'agriculture, de la chasse et de la pêche, dont la performance peut-être directement touchée par le climat, soit à court terme, soit de façon cumulative. L'ensemble de l'activité de ces industries représente une production d'une valeur de plus de 3,8 milliards de dollars. De même, il faut considérer la production d'électricité largement tributaire des précipitations de neige et de pluie, qui atteignait en 2001 les 7,8 milliards de dollars, ainsi que la consommation d'énergie pour fins de chauffage et de climatisation, représentant plusieurs milliards de dollars annuellement. Il faut aussi ajouter les industries de transformation des ressources naturelles, telles l'agroalimentaire, les produits en bois, les pâtes et papiers, ainsi que la première transformation des métaux dont les activités pourraient être également touchées dans une certaine mesure par des changements de disponibilité et de coût de leurs

approvisionnements en matière première ou en énergie – la valeur de leurs productions se chiffrant à plus de treize milliards de dollars.

Quant aux industries des services à la population, elles risquent de connaître des conditions d'exploitation modifiées et de faire face à des besoins accrus et différents. Ainsi, le secteur récréo-touristique d'hiver et d'été, dont les activités de restauration et d'hébergement représentent des ventes de plus de 4 milliards de dollars, pourrait être avantagé ou désavantagé en fonction de sa capacité de tirer parti des conditions changeantes du climat québécois. Les services de santé et les services sanitaires pourraient aussi être affectés sensiblement. D'autres industries risquent d'être touchées en partie, notamment les transports routiers et maritimes. Enfin, le domaine des services financiers et plus particulièrement celui des assurances, devra s'ajuster à une plus grande fréquence de certains types d'événements météorologiques extrêmes, qui se traduiront par des incertitudes accrues et des coûts supérieurs d'indemnisation.

En somme, une partie importante de l'économie québécoise sera directement ou indirectement touchée par les changements climatiques ; dans certaines régions davantage axées sur l'exploitation des ressources naturelles, c'est une portion encore plus grande de l'activité économique qui est mise en cause. Il faut cependant prendre en compte le fait que les impacts se feront aussi sentir sur les économies voisines et concurrentes ce qui pourrait modifier le sens et l'ampleur de l'incidence réelle sur le Québec des changements appréhendés.

LES RÉGIONS DU POINT DE VUE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Les données concernant le territoire et les formations géologiques, le climat et les zones de végétation ainsi que la population, l'économie et l'emploi nous amènent à considérer la problématique des changements climatiques au Québec en fonction de quatre régions distinctes : l'Arctique, la région Ressources, la région Maritime et le Sud du Québec (voir figure 13). Pour chacune de ces régions, l'impact des changements climatiques risque de se faire sentir de façon différente, en raison non seulement de l'importance des changements climatiques qui surviendront, mais aussi de la réaction de l'environnement naturel et humain à ces changements.

La **région de l'Arctique** est probablement celle qui subira les plus importants changements quant au climat et à la modification de son environnement, notamment avec la fonte appréhendée d'une grande partie de son pergélisol. Même si les populations touchées sont peu nombreuses, les contraintes liées à l'éloignement, à l'étendue et au climat rendent l'adaptation plus complexe.

Plus au sud, dans la **région Ressources** du plateau laurentien recouverte de forêts de conifères, l'impact potentiel des changements climatiques sur les grands réservoirs et les grandes exploitations forestières revêt une importance économique majeure tant pour l'ensemble du Québec que pour les populations de cette région. L'ampleur du territoire

demande une analyse qui tient compte des phénomènes climatiques propres à chaque sous-région ou bassin versant.

Pour ce qui est de la **région Maritime**, en raison du rehaussement du niveau de la mer, de la diminution de la période d'englacement et de la possibilité d'une amplification des tempêtes, elle pourrait connaître une accentuation des problèmes d'érosion côtière. Comme pour la population, les axes de transport et l'économie de cette région sont très fortement concentrés en bordure de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent multipliant ainsi les impacts appréhendés.

Quant à la **région Sud du Québec**, située dans la plaine du Saint-Laurent et les Appalaches et où se concentrent la grande majorité de la population et des activités économiques très diverses, elle sera touchée de plusieurs manières. Les écosystèmes diversifiés du Saint-Laurent risquent d'être sensiblement affectés. La santé humaine sera confrontée à des vagues de chaleur plus fréquentes et intenses, à de nouveaux vecteurs de maladie infectieuse, à la modification de la qualité de l'air et aux risques accrus liés à l'approvisionnement en eau. Certaines industries, notamment l'agriculture, le transport et le tourisme, devront modifier leur façon de faire pour réduire les coûts occasionnés par les changements climatiques et profiter des avantages qu'ils pourraient susciter.

Figure 13

Les régions du Québec
du point de vue des
changements climatiques
(Ouranos, 2002)



(Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs)

L'ARCTIQUE QUÉBÉCOIS

La région de l'Arctique québécois, au nord du 55° parallèle, couvre environ 20 % de la superficie du Québec. Elle est entièrement comprise dans le Nunavik. Sa population – essentiellement autochtone et s'élevant à près de 10 000 personnes – est dispersée dans une quinzaine de villages situés en bordure de la baie d'Hudson et de l'océan Arctique. C'est probablement la région qui subira les plus importants changements en matière de climat et de modification de son environnement avec, notamment, la fonte potentielle d'une grande partie du pergélisol qui est continu au nord de 60°N.

LE PERGÉLISOL

Le pergélisol existe en raison du climat qui affecte également son régime thermique. Présent dans les roches et dans divers sols meubles, et composé en forte proportion d'un minéral instable – la glace –, le pergélisol est aussi un phénomène géologique.

Le pergélisol se définit comme *tout sol ou toute roche dont la température se maintient sous 0 °C pendant au moins deux années consécutives* (Comité associé de recherche géotechnique, 1988). Dans les faits, la durée de cet état thermique s'étend presque partout sur plusieurs centaines d'années. Chaque été, la couche superficielle du terrain, nommée *mollisol*, dégèle et regèle à la saison froide. La profondeur du mollisol pour une année donnée (profondeur maximale atteinte par le *front de dégel*) dépend de la chaleur atmosphérique estivale. L'interface entre le mollisol et le pergélisol s'appelle le *plafond* du pergélisol.

Dans le sol gelé, les températures fluctuent selon les saisons. L'ensemble des changements de température qui affectent le mollisol et le pergélisol constitue le *régime thermique du pergélisol*. Pour que le pergélisol se maintienne, la température moyenne annuelle à la surface du sol doit être inférieure ou égale à 0 °C. Compte tenu des facteurs de surface, qui réduisent les pertes de chaleur du sol au contact de l'atmosphère (comme la couverture de neige qui isole partiellement le sol en hiver, la couverture végétale, l'épaisseur des horizons organiques et l'humidité), la température moyenne de l'air doit être en général inférieure de quelques degrés à 0 °C, pour que la température annuelle moyenne de surface du sol soit égale à 0 °C.

Comme matériau de fondation, le pergélisol est très solide, la glace et le mélange sol-glace étant capables de supporter de grandes charges. Les concepts de construction et de fondation d'infrastructures ont jusqu'à présent consisté, pour la plupart, à maintenir le sol gelé. Par exemple, on établit des radiers dans lesquels le plafond du pergélisol remonte, on ventile les espaces sous les bâtiments pour éviter que la chaleur dégagée par ceux-ci se transmette au sol sous-jacent et on utilise parfois des techniques spéciales pour réfrigérer le sol sous le bâtiment (Comité associé de recherche géotechnique, 1988).

La situation au Québec

Le pergélisol occupe une vaste superficie du territoire québécois (figure 14). À sa marge méridionale, il est discontinu, c'est-à-dire qu'il apparaît par plaques de superficies variables sur le terrain, parce que la température y est un peu moins froide et que les facteurs de surface sont très variables.

Figure 14

Le pergélisol (Allard et Séguin, 1987)



Cette zone discontinue, où le pergélisol est à près de 0 °C et d'épaisseur relativement faible (quelques dizaines de mètres), correspond sensiblement à la zone écologique de la toundra forestière, débordant un peu dans le nord de la forêt boréale (Allard et Seguin, 1987). Dans la zone continue, qui correspond globalement à la toundra, il existe un fort gradient climatique nord-sud (ainsi, les températures moyennes annuelles de l'air passent de -4,5 °C à Kuujuaq à -9 °C à Salluit, environ). L'épaisseur du pergélisol varie de quelques dizaines de mètres au sud à plusieurs centaines de mètres au nord. Ce gradient se répercute dans les températures mesurées des sols (voir figure 15).

La figure 15 illustre les profils de température dans les sols de deux villages nordiques, Salluit et Kangiqsuaq ; elle montre également que les profils mesurés en 2001 et 2002 sont plus chauds que ceux mesurés dans les années 1990, la dernière décennie ayant connu un réchauffement important (Allard *et al.*, 2002).

Sur le plan géologique, le territoire du Nord est en très grande partie établi sur les roches du Bouclier canadien et sur des dépôts glaciaires sableux et graveleux (tills et dépôts fluvio-glaciaires). Dans les roches, le pergélisol contient généralement peu de glace (dans la structure), de sorte que sa fonte a généralement des impacts très limités. Dans les tills et les dépôts fluvio-glaciaires, la glace du pergélisol est en dominance interstitielle, de sorte que sa fonte engendre relativement peu de perturbation.

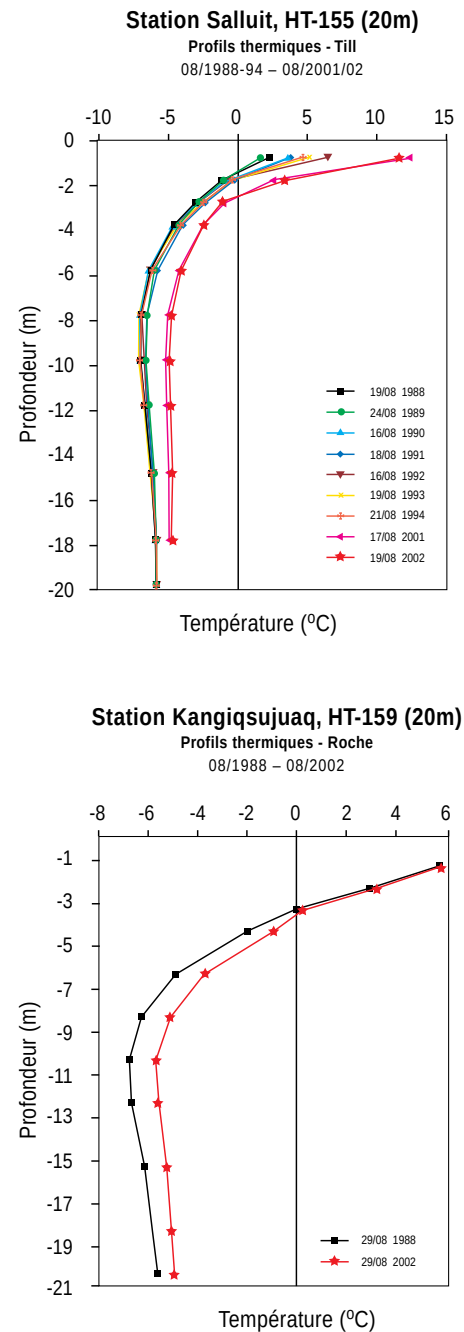
Par contre, les régions côtières où sont situés tous les villages recèlent des sols argileux, silteux et sableux dont la disposition stratigraphique et la composition sédimentologique sont très variables d'un endroit à l'autre. Ces sols à texture fine contiennent pour la plupart des teneurs très élevées en glace, notamment de la glace de ségrégation.

Impacts appréhendés

Les températures hivernales plus chaudes et l'épaisseur accrue de la couverture de neige (par suite d'une augmentation des précipitations), en plus de l'accroissement des degrés-jours de chaleur estivale, feront augmenter la température du pergélisol. Sur une courte période (3 à 5 ans) et avec une faible hausse de température (quelques dixièmes de degrés en moyenne par an), les facteurs de surface amortiront les changements et retarderont un peu la fonte. Mais à plus long terme ou, encore, si la température augmente plus vite, le transfert de chaleur de l'atmosphère au sol ne pourra qu'entraîner la fonte du pergélisol. Aux endroits où le pergélisol est peu épais et où il est près de 0 °C, la fonte pourra être très rapide, n'étant retardée que par la chaleur latente de fusion de la glace. Aux endroits où il est épais, le regel hivernal ne parviendra plus éventuellement à rejoindre le plafond du pergélisol ; des tassements et des glissements de terrain pourraient alors survenir sur les pentes.

Figure 15

Gradient de la température des sols dans deux stations arctiques (Allard *et al.*, 2002)





Les approches utilisées jusqu'à maintenant dans le domaine de la construction et sur lesquelles repose la stabilité du bâti existant ne pourront plus assurer le maintien du pergélisol, entraînant ainsi des risques pour les infrastructures, les résidences et les autres bâtiments. De plus, les nouvelles constructions et les nouveaux aménagements devront dorénavant tenir compte du réchauffement climatique et de la dégradation inévitable du pergélisol que celui-ci engendrera.

Tous les villages du Nunavik ne connaissent pas le même niveau de risque. Les villages en partie ou en totalité construits sur des sols argileux riches en glace pourraient connaître les dommages les plus importants et nécessiter d'ici quelques années des mesures d'atténuation d'impacts et d'adaptation. Salluit se présente comme le cas le plus difficile à cet égard. D'autres villages ont des conditions de terrain qui pourraient s'avérer problématiques. Cependant, il faut considérer qu'il s'agit dans la plupart des cas de problèmes liés à la présence d'une ou de quelques zones de sol sensible dans des secteurs donnés. Toutefois, ces secteurs sensibles peuvent nécessiter des relevés géophysiques et des forages relativement coûteux permettant de les mettre en évidence et de les délimiter.

Les conséquences pour les villages concernent les grands bâtiments comme les écoles, les centres communautaires et autres bâtiments publics. Un impact important touche la construction résidentielle rendue nécessaire par une très forte croissance démographique. Afin de limiter le coût des interventions, on devra envisager une planification urbaine mieux élaborée que celle d'aujourd'hui et fondée sur une connaissance adéquate des conditions locales de pergélisol. Il faudra peut-être aussi améliorer les techniques de construction des radiers et les modalités de drainage des terrains.

Il faut aussi prévoir que les pistes d'atterrissage desservant trois villages auront besoin de travaux de réfection, dont une nécessitera des rénovations majeures, pouvant aller jusqu'à la modification de leur géométrie et des travaux périodiques de resurfaçage. Les autres pistes devront faire l'objet d'une surveillance accrue.

L'allongement escompté des étés aurait aussi comme conséquence l'épaississement du mollisol ; cela libérerait en fin de saison de l'eau de fonte qui générerait des pressions internes pouvant entraîner des décrochements de mollisol et des glissements régressifs. Cette dégradation du pergélisol aurait des effets écologiques qui sont encore peu documentés : impact sur la turbidité des cours d'eau, création de multiples lacs, agrandissement des terrains marécageux, changements végétaux notamment par le passage de muscinaies et de lichénaires à des arbustives. Ces processus sont susceptibles d'affecter le régime des bassins des cours d'eau. Alliée aux changements écologiques des domaines végétal et animal, la dégradation du pergélisol contribuera vraisemblablement à une reconfiguration importante des écosystèmes nordiques.

Impacts sur les populations

Ces changements dans l'environnement arctique auront aussi des conséquences sur les populations autochtones vivant au nord du 55° parallèle. Ainsi, le déplacement des populations occasionné par les dommages aux infrastructures dus à la fonte du pergélisol pourrait causer des problèmes psychosociaux. Des problèmes d'ordre nutritionnel liés aux impacts sur les écosystèmes pourraient s'ajouter. Par ailleurs, un réchauffement climatique pourrait faire se déplacer certaines espèces animales et végétales vers le nord, créant ainsi une plus grande diversité de nourriture pour les populations. La hausse des températures pourrait également allonger la durée des saisons de chasse et de pêche, ce qui accroîtrait la quantité de nourriture traditionnelle consommée par les autochtones. Toutefois, une modification dans la distribution et la stabilité de la glace ainsi que dans la composition de la neige, principalement dans la région arctique et les zones nordiques, pourraient entraîner davantage de décès et de blessures causés par des accidents reliés aux déplacements sur la banquise.

Stratégies d'adaptation

Afin de minimiser les impacts des changements climatiques appréhendés dans l'Arctique québécois, il faudrait que partout dans le Québec nordique des études complètes soient effectuées avant d'entreprendre toute construction, y compris des mesures thermiques et l'évaluation des transformations à venir en fonction des changements climatiques. La cueillette d'un bon échantillonnage par forage (carottage gelé) et des mesures de températures s'imposent pour bien connaître les conditions du pergélisol. En terrain naturel, même à l'intérieur des terres, sur les tills et les dépôts sableux, on pourrait faire des découvertes surprenantes ; par exemple, il pourrait y avoir par endroits des tills à matrice fine riches en glace, de la roche fissurée ou stratifiée contenant de la glace, des sols organiques gelés, des zones de suintement de la nappe phréatique formant de la glace.

Les mesures à prendre et les pratiques à envisager visent le territoire bâti et d'éventuels projets industriels d'envergure. Les impacts en milieu naturel sont plus difficiles à cerner avec précision. Ils n'imposent pas de coûts immédiats, mais les changements environnementaux qu'ils causeront pourraient éventuellement entraîner des coûts indirects pour la construction d'ouvrage à des fins de production hydroélectrique. Là aussi, la cueillette d'information détaillée sur l'évolution des conditions du pergélisol est importante.

Enfin, plus spécifiquement, afin de réduire les coûts anticipés de l'adaptation aux changements climatiques pour les communautés et leurs bailleurs de fonds (par exemple, réclamations pour déménagement de bâtiments et de maisons ainsi que poursuites légales), on pourrait prendre les mesures suivantes dans les territoires couverts par le pergélisol :

- Effectuer une étude des conditions du pergélisol de chaque communauté. Pour les cas apparemment sans problème, une telle étude peut consister en quelques heures de vérification et d'enquête auprès de la population. Le cas de Salluit est déjà en cours d'étude. La méthodologie mise au point pour cette étude sera applicable dans les autres communautés.
- Maintenir un réseau de suivi climatique et thermique. Une bonne partie de ce réseau est déjà en place depuis la construction des aéroports entre 1987 et 1992. Quatre sites restent à instrumenter : Kuujuaq, Kangirsuk, Ivujivik et Inukjuak. Des réparations aux installations sont à effectuer à quelques endroits.
- Analyser les lectures et les séries de données du réseau en fonction des scénarios climatiques, en effectuant des calculs ou en appliquant un modèle de transfert de chaleur de façon à anticiper les problèmes à venir. Ces mesures et ces calculs permettraient d'établir des seuils locaux de changement thermique au-delà desquels les installations identifiées deviendront à risque.
- Élaborer des normes de construction adaptées au milieu nordique en fonction des terrains, des sols et des changements climatiques.

LA RÉGION RESSOURCES

Plus au Sud, la région Ressources couvre la moitié du territoire québécois. Localisée principalement sur le plateau laurentien, elle est surtout constituée de forêts de conifères ou taïga et abrite une population de plus de 500 000 habitants. L'impact potentiel des changements climatiques sur les vastes réservoirs hydroélectriques et les grandes exploitations forestières revêt une importance économique majeure pour le Québec tout entier, tout autant que pour les populations de cette région dont l'économie est intimement liée à l'exploitation des ressources.

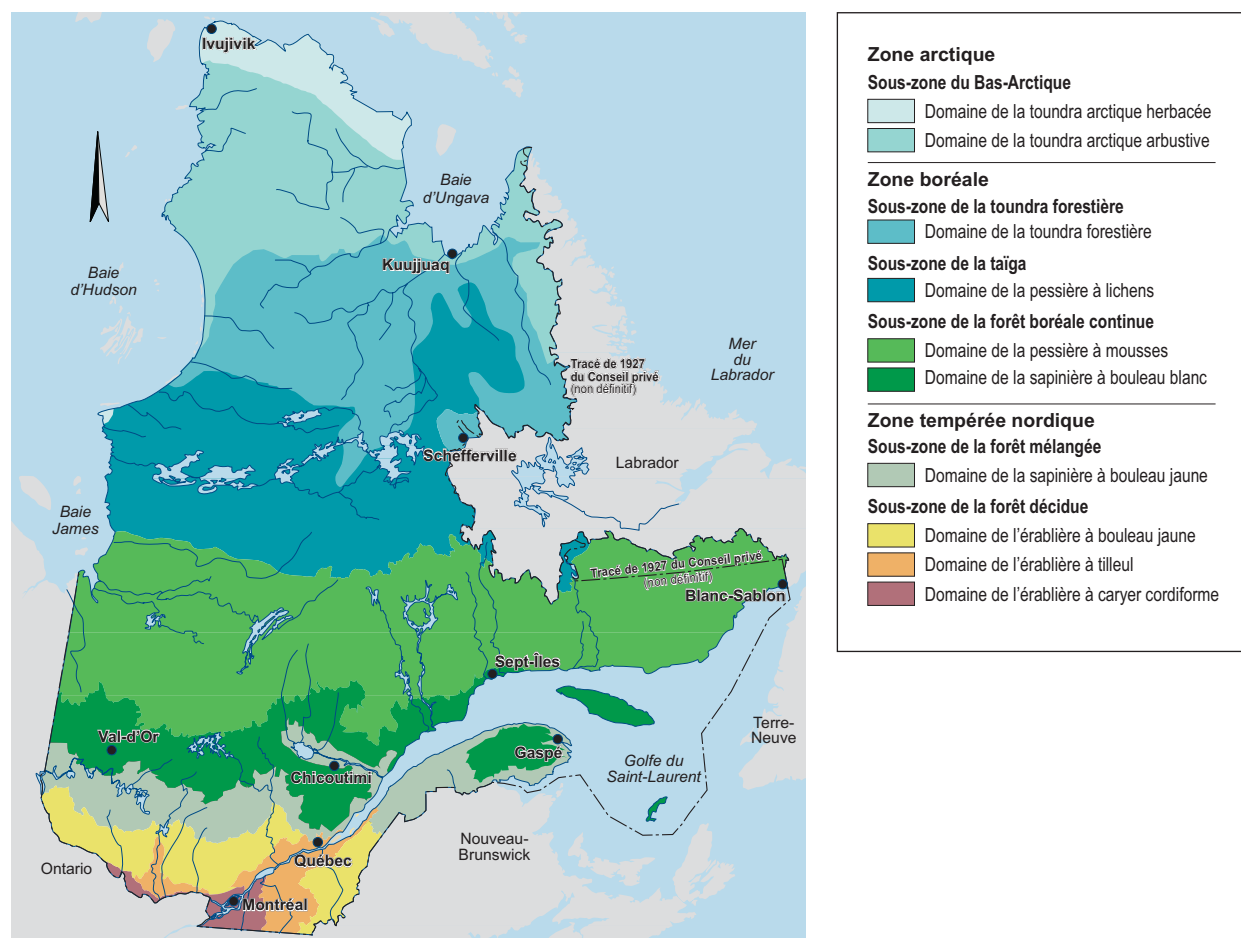
LA FORÊT

La forêt couvre environ la moitié du territoire québécois, soit 757 900 km². Le domaine forestier s'étend sur sept degrés de latitude ; il n'est donc pas étonnant d'y retrouver trois grandes zones bioclimatiques fort différentes, que la diversité des forêts reflète en grande partie. C'est ainsi que, du nord au sud, se succèdent la forêt boréale, la forêt mélangée et la forêt méridionale.

La forêt boréale couvre 73,7 % du Québec forestier. Elle renferme majoritairement des sapins baumiers, des épinettes noires, des épinettes blanches, des pins gris et des mélèzes. Les seuls feuillus qui y croissent sont le bouleau à papier, le peuplier faux-tremble et le peuplier baumier. Quant à la forêt mélangée, elle se compose de résineux et de feuillus. Enfin, la forêt méridionale est dominée par les feuillus.

Figure 16

Les zones forestières
(Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, 2003)



Les plus abondants sont l'érable à sucre, le bouleau jaune et le hêtre ; il y a aussi des cerisiers tardifs, des tilleuls, trois espèces de chênes, trois de frênes, deux de caryers, trois autres espèces d'érables et deux de peupliers. La forêt méridionale renferme aussi certaines essences résineuses comme le pin blanc, le pin rouge, la pruche et le thuya.

La forêt est à la base de l'activité économique de nombreuses collectivités, qu'il s'agisse de production de bois d'œuvre, de pâtes et papiers ou encore de biomasse. Elle constitue un milieu de vie pour les communautés locales et autochtones. Elle abrite un très grand nombre d'espèces animales et végétales. Enfin, elle représente une composante essentielle du mode de vie des Québécois en offrant un cadre pour les activités récréatives de plein air, telles que la randonnée, la chasse et la pêche ou le camping et la villégiature.

Impacts appréhendés

En plus de définir le paysage forestier, le climat a un effet sur la majorité des processus métaboliques des arbres comme la croissance et la reproduction, et les processus du sol, telle la minéralisation. À des degrés divers, il a également un effet sur la fréquence et l'intensité des feux de forêt, des épidémies d'insectes, des maladies ainsi que sur l'occurrence des événements climatiques extrêmes.

Un réchauffement de température, de 0,15 à 0,5 °C en été par décennie, accompagné selon les régions d'une hausse modérée des précipitations, devrait avoir un impact d'abord sur la santé et la croissance des arbres. Plusieurs études ont montré qu'une augmentation de température avait un effet positif sur la croissance (Courchesne, 2001 ; Brooks, 1998) et la productivité de plusieurs essences (Churkina et Running, 2000). Il a par contre été établi que des conditions plus froides et plus humides favorisaient la croissance de l'épinette noire (Brooks, 1998). De même, une hausse des concentrations de CO₂ pourrait avoir un effet positif sur la croissance de certains arbres en augmentant l'efficacité de l'utilisation de l'eau, mais il reste à préciser l'impact de cet effet sur l'ensemble des espèces du Québec. Selon les auteurs, les effets escomptés d'une hausse de CO₂ varient de nul à très positif selon l'espèce et le stade de développement. De manière générale une augmentation de concentrations de CO₂ favoriserait de façon décroissante les espèces herbacées annuelles, les herbacées vivaces, les arbres feuillus et les conifères; les arbres plus jeunes étant avantagés par rapport aux plus vieux (Korner, 1993). Par contre, la disponibilité de l'eau est un facteur limitant la productivité de plusieurs essences. Une étude réalisée dans l'ouest du Québec (Hofgaard, 1999) a démontré que des précipitations plus importantes en juin de l'année courante et de l'année précédente auraient eu un effet positif sur la croissance de l'épinette noire.

En théorie, cela se traduirait à plus ou moins long terme, en avantages compétitifs pour certaines espèces alors que

d'autres espèces seraient affectées négativement par l'effet combiné des précipitations et de la chaleur accrues. En général, on prévoit un déplacement de la forêt mixte tempérée dans l'aire de la forêt boréale et une progression de la forêt boréale dans la région subarctique (Rizzo et Wilken, 1992). Certains de ces changements pourraient ainsi apparaître dans les zones limites. La migration des espèces serait très variable et rencontrerait des obstacles importants comme la nature des sols et les conditions d'humidité. On pourrait peut-être observer à l'échelle locale un des premiers signes de cette migration, notamment en dressant, au stade de la régénération, la liste des espèces les mieux adaptées aux nouvelles conditions climatiques.

Par contre, les hypothèses précédentes pourraient être complètement fausses si l'on tient compte des effets des changements climatiques sur les insectes, les maladies et les feux de forêt. En particulier, on pourrait assister à une augmentation de l'intensité des épidémies de certains insectes, telle la tordeuse des bourgeons de l'épinette (Jardon *et al.*, 1994). Il y a lieu de s'interroger aussi sur l'impact des changements combinés de chaleur, de précipitations et de concentrations de CO₂ sur la fréquence et l'ampleur des feux de forêt (Flannigan *et al.*, 2000). Bien que les études, selon les périodes examinées ne concluent pas toutes à un plus grand risque d'incendies, une sécheresse accrue associée à une plus grande fréquence des orages devrait normalement entraîner un plus grand nombre de feux de forêt. De plus, l'état de la végétation par suite de maladies et autres perturbations pourrait influencer l'ampleur de ces derniers (Bergeron et Leduc, 1998). À l'inverse, selon la documentation québécoise, dans un scénario qui se limiterait à doublement des concentrations de CO₂ et qui se traduirait par un climat plus chaud et plus humide, la fréquence des incendies serait réduite (Bergeron *et al.*, 2001).



Selon les modèles climatiques, les réchauffements seraient relativement plus importants en hiver qu'en été, ce qui pourrait augmenter les dommages aux arbres. Des températures hivernales soutenues combinées à une couverture de neige au sol et à l'absence de pluie seraient bénéfiques aux arbres, contrairement aux hivers ponctués de dégels et de froids intenses, sans neige au sol – situation qui pourrait se produire n'importe quand si les précipitations tombent souvent sous forme de pluie, exposant au gel les jeunes plants et les racines. En particulier, les espèces sensibles au dégel comme le bouleau jaune (Zhu *et al.*, 2002) et le bouleau blanc (Cox et Malcolm, 1997), pourraient montrer des signes de dépérissement. Enfin, le réchauffement en hiver pourrait favoriser la croissance de certains insectes nuisibles alors que d'autres insectes seraient désavantagés par la diminution de la couverture de neige.

Par ailleurs, une augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes pourrait aussi perturber la croissance des forêts comme en témoigne l'impact considérable de la tempête de verglas de 1998, qui a touché plus particulièrement la région des érablières. Ailleurs dans le monde, on se souviendra des vents violents qui ont balayé la France et détruit de nombreuses forêts matures. Les événements extrêmes (canicules, sécheresses, dégels en hiver et gels tardifs) pourraient être à l'origine de problèmes plus importants que ceux liés au changement de la température moyenne (Flannigan, 1998 ; Cox et Malcolm, 1997).

L'une des industries forestières sensibles aux changements climatiques est celle de la production de sirop d'érable. En effet, celle-ci dépend de l'alternance des journées de dégel avec des nuits froides. La production pourrait être grandement réduite dans certaines régions si, dès le début de la saison des sucres, se succèdent des jours et des nuits sans gel. Ce problème a aussi été identifié en Nouvelle-Angleterre relativement aux impacts appréhendés des changements climatiques.

En résumé, les impacts des changements climatiques sur la croissance des arbres en tenant compte de tous les facteurs y compris notamment l'incidence sur les feux de forêts, les insectes et les maladies pourraient être très significatifs. L'industrie forestière est si importante dans l'économie québécoise que les impacts des changements climatiques sur les forêts auraient forcément des conséquences considérables sur la société québécoise. Cependant, de nombreux facteurs entrent ici en ligne de compte dont l'impact sur les producteurs concurrents, l'évolution des technologies et l'évolution de la demande des produits de la forêt. Comme les principaux impacts négatifs ne devraient survenir qu'à plus long terme, l'industrie devrait dès maintenant envisager les stratégies d'aménagement et d'utilisation de la ressource qui lui permettront de s'ajuster aux situations appréhendées.

Stratégies d'adaptation

Les stratégies d'adaptation potentielles sont nombreuses et passent par des pratiques de gestion des forêts qui tiennent compte à la fois des changements appréhendés dans le régime des précipitations et de l'accroissement des températures. Le choix des espèces (Carter, 1996), en privilégiant les espèces ou génotypes plus résistants aux changements climatiques, peut être de la première importance. Les modes de coupes peuvent aussi avoir un effet sur la réaction des forêts aux changements climatiques en favorisant la pénétration de certaines espèces plus à l'aise dans ce type d'environnement et en modifiant la disponibilité naturelle des semences des espèces susceptibles de migrer. Enfin, l'adaptation de la lutte contre les feux de forêt en fonction des objectifs recherchés continue de s'imposer.

Des stratégies particulières devront être adoptées selon les diverses circonstances environnementales, sociales et économiques. Un élément central de l'adaptation est la prise en compte par l'industrie des résultats et des efforts de la recherche. Il y aura lieu, en particulier, de s'intéresser aux impacts des changements climatiques sur les espèces dont la rotation de culture est la plus longue et qui risquent davantage de subir le plein impact des changements.

Les connaissances sur l'impact des changements climatiques sur les forêts sont pour le moment parcellaires et incomplètes. Des études concernant la réaction de certaines plantes à des changements environnementaux ont été réalisées, mais il faudrait mieux connaître leur réaction dans leur milieu réel en situation de concurrence avec d'autres espèces.

Les effets escomptés sur la migration des espèces végétales restent peu connus. En fait, il faudrait connaître, aux divers stades de développement (semis, gaule, etc.), les effets des changements climatiques sur chaque espèce, en fonction de paramètres comme la température, le rythme maximal des changements, le seuil critique tolérable, les processus métaboliques en cause (photosynthèse, respiration nocturne, reproduction sexuée, capacité compétitrice au stade de la régénération, etc.). De plus, la contribution des forêts du Québec aux bilans de carbone et aux changements climatiques, soit comme source d'émissions soit comme potentiel d'absorption, devrait également faire l'objet de recherches plus poussées.

LA PRODUCTION D'HYDROÉLECTRICITÉ

La production d'électricité occupe une place importante dans l'économie du Québec avec près de 4 % de la production intérieure brute et au cours de la dernière décennie de 5 à 12 % des investissements totaux. En outre, cette ressource a permis au Québec de jouir d'approvisionnement à bas prix et a constitué un facteur de localisation prépondérant pour plusieurs industries exportatrices majeures telles que l'aluminium et les pâtes et papiers.

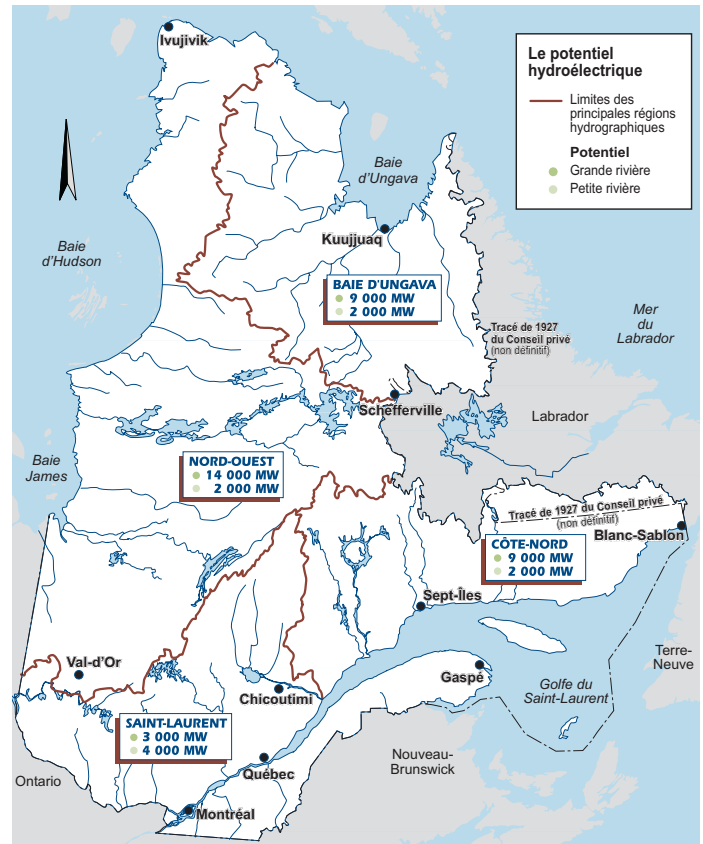
Le Québec dispose d'une puissance électrique installée de plus de 40 000 mégawatts (MW), lui permettant de satisfaire plus de 41 %¹⁰ de ses besoins énergétique totaux. La production d'électricité provient à 94 % des centrales hydroélectriques. Au-delà de 80 % de la puissance hydroélectrique installée se situe au nord du 49° parallèle, dans la région Ressource. Sur ce vaste territoire, 95 % de la capacité installée profite du potentiel d'emménagement de réservoirs permettant un stockage annuel et pluriannuel, alors qu'au sud, 95 % de la capacité est formée de centrales au fil de l'eau. Cette particularité exige de distinguer les impacts des changements climatiques sur les centrales avec réservoir des centrales au fil de l'eau.

Il est évidemment important de déterminer les impacts des changements climatiques sur le parc de production existant. Il est tout aussi important d'en tenir compte pour les aménagements à venir puisque les horizons de temps de l'évolution du climat correspondent tout à fait à celles de la planification des grands ouvrages hydroélectriques. Le Québec disposerait encore d'un potentiel théoriquement aménageable de 45 000 MW dont une bonne partie pourrait être ajoutée à la production existante. Ce potentiel se répartit entre les grandes rivières (potentiel de production de 100 MW et plus), où il s'établit à environ 35 000 MW et les petites rivières (moins de 100 MW), où il est de l'ordre de 10 000 MW. La figure 17 présente les potentiels hydroélectriques théoriquement aménageables restants par bassins versants.

Les impacts des changements climatiques sur l'évolution de la demande énergétique interne et externe sont abordés dans la section « La demande d'énergie ». Toutefois, il est utile de rappeler que l'hydroélectricité offre des avantages énormes par rapport à l'utilisation des hydrocarbures du point de vue de la réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'hydroélectricité est donc une source d'énergie qui est appelée à être utilisée et développée à son plein potentiel. Discuter des scénarios de demande interne et des occasions d'affaires que présentent les marchés externes dépasse les objectifs de ce document. Cependant, il va de soi que toute stratégie d'adaptation à ce contexte favorable devra en tenir compte au niveau de l'évolution de la capacité de production et du développement des marchés internes et externes.

Figure 17

Le potentiel hydroélectrique
(Ministère des Ressources naturelles,
de la Faune et des Parcs, 2003)



Impacts appréhendés

Les modèles mondiaux de climat envisagent pour le Nord du Québec, à la fin du siècle, un scénario moyen d'augmentation des températures de 4 à 5 °C en hiver et de 2 à 3 °C en été qui auront pour principaux effets de réduire la période de gel et d'augmenter le taux d'évaporation et d'évapotranspiration durant la période d'eau libre. Cette augmentation des pertes d'eau dans l'atmosphère devrait cependant être compensée par une hausse importante de 10 à 25 % des précipitations en hiver et de 5 à 10 % des précipitations en été. Le bilan hydrique déduit de ces modèles globaux, indique donc une augmentation des apports d'eau dans les réservoirs du Nord québécois, malgré la hausse des températures.

10 La part de l'électricité dans le bilan énergétique était en 2002 de 41 % du bilan énergétique excluant la biomasse et de 37 % en incluant la contribution de la biomasse.

Ces résultats favorables au bilan hydrique doivent toutefois être utilisés avec certaines réserves. Les modèles de climat mondiaux ont beaucoup de difficulté à décrire correctement les conditions climatiques d'un Québec nordique, entouré d'eau et soumis à des conditions de circulation générale très changeantes. De plus, la résolution spatiale de seulement 400 km environ de ces modèles ne permet pas de bien rendre compte des Grands Lacs, de la Baie d'Hudson, du Groenland et autres considérations géographiques qui peuvent affecter d'une manière très différente les diverses régions du Québec.

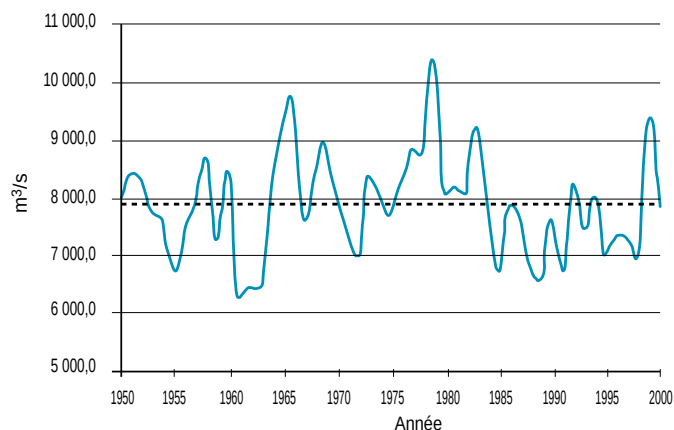
La figure 18 présente les apports naturels annuels moyens en mètres cube par seconde des bassins versants aménagés de la région Ressource pour les années 1950-2000. On y observe une grande variabilité d'approvisionnement en eau autour de la valeur moyenne historique associée aux fluctuations du climat. On y constate aussi que les apports observés depuis 1985 sont généralement sous la moyenne annuelle. Or, les modèles globaux de climat ne montrent pas de tendances à la baisse pour cette période. Cette tendance récente à la baisse semble plutôt corrélée avec certains indices climatiques globaux, comme l'oscillation Nord-Atlantique (ONA, discuté en plus de détail plus avant) et d'autres indices de circulation générale. Ces indices climatiques correspondent à des régimes de temps qui, malheureusement, ne sont pas encore bien compris et simulés par les modèles climatiques mondiaux.

Il est probable que les changements climatiques aient une incidence sur ces régimes de temps. L'augmentation de l'hydraulicité prévue par les modèles climatiques mondiaux reste inférieure à un écart-type (1961-1990) et pourrait donc être annulée par la variabilité naturelle des régimes de temps encore imparfaitement modelée et comprise. Ces régimes de temps semblent d'ailleurs affecter différemment diverses régions du Québec et sont surtout notables dans le Nord. D'autres types de changements, ceux-là causés par des effets locaux, par rapport à des modifications globales pour les régimes de temps, pourraient favoriser les apports pour une région donnée. Par exemple, l'absence prolongée de glace sur la baie d'Hudson favoriserait des apports accrus sur la partie nord-ouest du Québec. Il importe donc de consentir les efforts majeurs requis pour mieux comprendre les facteurs responsables des variations de l'hydraulicité, et pour développer les outils et les modèles qui permettront une meilleure résolution spatiale des divers phénomènes de manière à prévoir la climatologie des prochaines décennies, des diverses régions du Québec.

Pour le Sud du Québec, il semble plus certain que la hausse des températures de 2 à 3 °C en été et de 3 à 4 °C en hiver entraînera une augmentation notable de l'évaporation et de l'évapotranspiration, provoquant des conséquences importantes sur la disponibilité en eau dans le bassin versant des Grands Lacs et ainsi une réduction des quantités d'eau à turbiner pour les centrales hydroélectriques sur le Saint-Laurent. La hausse attendue des précipitations de 0 à 5 % en été et de 10 à 20 % en hiver ne serait pas suffisante pour compenser ces pertes.

Figure 18

Apports annuels moyens des bassins versants aménagés de la zone Ressource (Hydro-Québec, 2003)



Changements saisonniers

Dans le Nord, l'effet des températures accrues en hiver permettrait d'alimenter davantage les réservoirs annuels par des précipitations à l'état liquide survenant plus tard en début d'hiver alors que les crues printanières de fonte de neige pourraient être plus hâtives et moins importantes. Sur une base annuelle, le nouveau régime climatique aurait donc un effet régulateur naturel plus grand et pourrait exiger de revoir les modes de gestion des réservoirs.

Dans le Sud, l'effet régulateur associé aux températures à la hausse en hiver et au printemps devrait être également avantageux, compte tenu du fait que les centrales exploitées dans cette région sont au fil de l'eau. En effet, un début tardif de l'hiver, ainsi qu'un printemps hâtif permettraient d'exploiter à plus grande capacité ces centrales à une période où généralement la production est limitée par la disponibilité de la ressource eau et par des contraintes de glace en rivière. Cette réduction de la période hivernale devrait également permettre de mieux gérer les crues dont le volume serait réduit et ce, même en dépit d'une légère augmentation des précipitations en hiver et au printemps. Ceci aiderait ainsi à limiter davantage les déversements non productibles et les inondations printanières affectant les riverains installés à proximité des installations hydroélectriques.

L'augmentation des températures en début d'hiver pourrait aussi avoir des effets sur la productivité des centrales au fil de l'eau. En effet, pour ce type de centrales, il importe de construire adéquatement la couverture de glace à l'amont de l'ouvrage hydraulique au début de l'hiver. Une couverture de glace lisse au contact avec l'eau permet d'augmenter le rendement de la centrale adjacente en réduisant l'effet de friction. Cette contrainte exige dans certains cas que l'on

restreigne la production de la centrale durant plusieurs jours. Or, si le gel/dégel amène la répétition de la formation de la couverture de glace, cette situation pourrait affecter la production hydroélectrique sur une plus longue période. De plus, l'alternance plus fréquente de périodes de gel et de dégel pourrait, pour certaines centrales, entraîner des problèmes de frasil plus fréquents et affecter la gestion des centrales concernées.

Augmentation des événements de précipitations extrêmes

Bien que le niveau d'incertitude soit encore élevé, il semble que l'on soit en droit de s'attendre à une augmentation de la fréquence des événements extrêmes. Pour le Nord du Québec, des événements hydrologiques extrêmes pourraient entraîner des déversements non productibles plus fréquents. Certes, les conséquences économiques de tels déversements sont importantes, mais elles ne devraient pas affecter l'intégrité des installations ni les populations environnantes. Cette considération est toutefois plus importante pour le Sud du Québec où la densité de la population vivant à proximité des berges et la présence de centrales au fil de l'eau requièrent une plus grande attention.

Stratégies d'adaptation

Les incertitudes élevées associées aux prévisions à long terme des apports naturels dans la région Ressources ne permettent pas d'envisager la mise en œuvre rapide à court et moyen termes de mesures d'adaptation. Pour chacune des zones de production hydroélectrique d'intérêt, il convient en premier lieu de travailler à l'amélioration des scénarios climatiques afin d'en mieux comprendre les conséquences sur le régime hydrologique.

Même si dans l'ensemble, les apports s'avéraient similaires ou légèrement supérieurs, il est probable que la distribution spatiale ainsi que la répartition intra-annuelle des apports soient significativement affectées. Pour les régions qui seraient favorisées par des apports accrus, il sera intéressant d'envisager l'ajout de capacité de production à des centrales existantes. Cette considération pourrait également rendre plus attrayants certains projets d'aménagement dans des régions susceptibles de voir accroître leur potentiel hydraulique. À l'inverse, une diminution des apports exigerait de planifier de nouveaux équipements de production ou encore de mettre en œuvre des mesures de gestion de la demande.

Les stratégies de remplissage et de gestion du parc de production existant et la construction de nouvelles installations devront tenir compte des nouvelles conditions climatiques. Elles devront également prendre en considération le

contexte économique global et régional, et s'ajuster à l'évolution des marchés cibles. Tel que mentionné plus haut, l'hydroélectricité est une source d'énergie de grande valeur pour réduire globalement ou localement les émissions des gaz à effet de serre. Les divers scénarios envisageables pour l'utilisation de cette ressource auront donc un impact déterminant. Par exemple, une stratégie conçue pour faire face principalement aux besoins de chauffage serait nécessairement différente d'une stratégie développée pour accommoder les besoins en climatisation de marchés interne et externe.

Événements extrêmes

Dans la région Ressources, la capacité de rétention des réservoirs ainsi que celle des ouvrages d'évacuation adjacents aux centrales conjuguée à des pratiques de gestion hautement sécuritaires permettent de limiter au minimum les conséquences d'événements hydrologiques extrêmes. Dans le Sud du Québec, où la densité des populations vivant à proximité des installations est beaucoup plus élevée, ces préoccupations revêtent une importance accrue. Bien sûr les modes de gestion sécuritaires des ouvrages hydrauliques au Québec permettent de se prémunir contre ce type d'événement rare. Si toutefois, la fréquence des orages intenses, caractérisés par de fortes précipitations sur une courte période de temps, était plus élevée, il y aurait sans doute lieu de reconsidérer la façon de gérer les ressources hydriques de manière à maintenir le niveau de sécurité des installations susceptibles d'être affectées.

Quant aux installations de transport, l'expérience acquise lors de l'important épisode de verglas dans le Sud du Québec en 1998, a déjà permis de revoir les critères de conception permettant de rendre le réseau de transport moins vulnérable.

Nouveaux équipements hydrauliques

Il importe d'analyser en détail toutes les régions considérées pour l'ajout de nouvelles installations de production. Les changements climatiques sont susceptibles de faire augmenter ou diminuer la disponibilité en eau de ces futures centrales dont l'espérance de vie laisse croire qu'elles seront affectées par ces changements. La conception même des installations devra tenir compte des changements climatiques à venir. Si le volume annuel des apports hydrologiques est susceptible d'augmenter, la capacité des unités de production devra en tenir compte. En ce qui concerne les ouvrages de rétention d'eau, un régime hydrologique annuel plus régularisé pourrait conduire à une réduction de la capacité de stockage.

État des connaissances

Il est clair que les analyses d'impacts devant mener à l'élaboration de stratégies d'adaptation dans le domaine de la production hydroélectrique profiteront de l'amélioration de nos connaissances dans différents domaines ciblés au cours des prochaines années. À cet égard, plusieurs collaborations avec la communauté scientifique universitaire sont déjà établies et l'expertise de très haut niveau se mobilise graduellement autour de la problématique des changements climatiques.

La qualité de l'analyse des impacts appréhendés d'éventuels changements climatiques sur la production hydroélectrique est étroitement liée à la précision des scénarios climatiques utilisés. Tel que discuté plus haut, il est essentiel de pouvoir disposer de scénarios de changements climatiques, à plus haute résolution, issus de modèles dynamiques ou statistiques, de façon à estimer avec plus de précision, les effets de changements climatiques à l'échelle du bassin versant. Il est donc essentiel de travailler de façon intensive au développement de ces outils de simulation climatique (Yarnal *et al.*, 2001).

Une autre piste très intéressante à poursuivre consiste à analyser les liens entre les conditions hydrologiques passées et les grands patrons de circulation générale de l'atmosphère. À cet effet, l'oscillation Nord-Atlantique (ONA), mérite d'être étudiée plus en détail. L'ONA est un phénomène atmosphérique et océanique qui concerne principalement l'Atlantique Nord. L'indice de l'ONA est calculé chaque année à partir de la différence de pression entre Lisbonne (Portugal) et Reykjavik (Islande), en prenant l'écart de pression par rapport à la moyenne de janvier à mars, sur plusieurs années. On parle d'oscillation parce qu'il y a un va-et-vient, dans la direction nord-sud, entre les régions arctiques et islandaises et la ceinture subtropicale près des Açores et de la péninsule ibérique. Des travaux récents montrent le lien entre l'ONA et le régime thermique dans la région des Grands Lacs et dans le Nord-Est des États-Unis et au Canada (Wettstein et Mearns, 2002).

Lorsque l'indice de l'ONA est positif, comme c'est généralement le cas depuis le début des années 1990, on prévoit pour le nord du Canada et le Groenland, des hivers plutôt froids et secs. Les observations d'Ouranos en matière de précipitations neigeuses dans la région Ressources pour cette période corroborent cette hypothèse selon laquelle un indice ONA positif se traduit par des années où les apports hydrologiques naturels sont généralement faibles (voir figure 18). Il semble donc que l'on puisse établir un lien entre l'ONA et le régime hydrologique annuel de ces systèmes. Il serait maintenant intéressant d'étudier l'effet à venir des changements climatiques sur l'ONA et possiblement d'autres indices liés aux patrons de circulation générale de l'atmosphère.

Rôle des zones humides sur le bilan hydrologique

En ce qui a trait aux systèmes hydriques nordiques, un effort substantiel est requis pour mieux évaluer le rôle des zones humides dans le bilan hydrologique. Bien que variable d'une région à l'autre en fonction de la topographie, la superficie des tourbières correspond à environ 15 % de la superficie totale des régions boréales, soit à peu près le même pourcentage que la surface occupée par les lacs. En ajoutant les autres milieux humides, comme les milieux riverains, certaines régions sont recouvertes à plus de 50 % par des écosystèmes humides et aquatiques. Étant donné l'étendue considérable de tous ces écosystèmes dans le Nord du Québec, il sera nécessaire de bien comprendre leur développement en fonction des changements climatiques passés et futurs (Payette et Rochefort, 2001).

Extension de séries climatologiques et hydrologiques

Étant donné la taille relativement modeste des périodes de mesure instrumentale des débits dans la région Ressources, l'extension de ces séries dans le passé, par le recours à des données dérivées (paléo indicateurs), pourrait permettre de mieux anticiper les impacts de changements climatiques dans l'avenir. Par exemple, la dendrochronologie permet de reconstituer certains paramètres climatiques et hydrologiques passés et de mieux comprendre la dynamique climato-hydrologique sous différents régimes climatiques, dont certains pourraient s'apparenter à ce que l'on entrevoit dans un contexte de changement du climat (Bégin, 2001).



LA RÉGION MARITIME

La région côtière du Québec est relativement étendue, s'étirant du début de l'estuaire du Saint-Laurent en aval de Québec jusqu'aux îles de la Madeleine dans le golfe du Saint-Laurent. Plusieurs agglomérations importantes y sont situées. En fait, la vie entière de la Gaspésie et des Îles-de-la-Madeleine, du Bas-Saint-Laurent et de la Côte-Nord est étroitement liée à la mer. Cette vaste région Maritime, qui regroupe près de 400 000 habitants, mérite une attention particulière du point de vue des changements climatiques, dans la mesure où elle sera directement affectée par le rehaussement du niveau de la mer ainsi que par l'amplification des tempêtes qui pourraient causer, entre autres, une accentuation des problèmes d'érosion côtière. En effet les changements climatiques devraient se traduire par une élévation du niveau des océans due à l'expansion thermique des masses d'eau et à la fonte des glaciers et des calottes glacières et par une augmentation des événements climatiques violents.

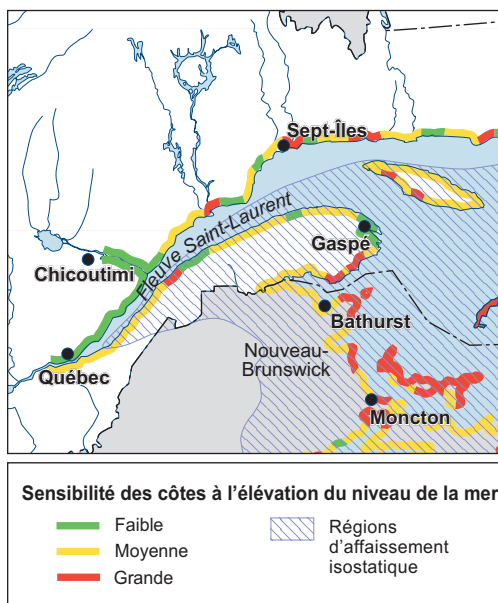
L'ÉROSION CÔTIÈRE

L'érosion côtière est un phénomène naturel. Elle est le résultat de l'action des vagues, des courants, des glaces, des écoulements des rivières et de l'activité humaine. Elle concerne essentiellement les régions de la Côte-Nord, de la Gaspésie et des Îles-de-la-Madeleine. Plusieurs municipalités sont directement concernées et les dommages potentiels aux bâtiments et aux infrastructures s'élèvent à plusieurs centaines de millions de dollars. La figure 19 montre en rouge, les parties de la côte québécoise les plus sensibles à l'érosion côtière. En jaune, on retrouve les zones de vulnérabilité moyenne. Comme on le voit sur la figure, une grande partie des côtes québécoises sont vulnérables, notamment celles qui se situent dans la partie hachurée de la carte qui correspond à la zone d'affaissement isostatique.

Sur la Côte-Nord, de Tadoussac à Blanc-Sablon (y compris l'île d'Anticosti), soit sur 1 825 km de long, 38 % des côtes sont moyennement sensibles à l'érosion, alors que 28 % y sont très sensibles (Dubois, 1999). Dans les zones fortement en érosion, le taux de recul est de 1 mètre par an et on trouve même des zones de 10 mètres par an.

Figure 19

Les zones sensibles à l'érosion côtière
(L'Atlas du Canada, 2003)



Dans le Bas-Saint-Laurent et la Gaspésie, presque toutes les côtes sont moyennement sensibles ou très sensibles à l'érosion. Déjà, il y a en Gaspésie, entre Sainte-Anne-des-Monts et Carleton, 112 km de côtes protégées par des ouvrages contre l'érosion. À la route 132, protégée sur 62 km, il faut ajouter des routes municipales et les voies de chemin de fer qui sont aussi exposées à l'érosion. Le ministère des Transports du Québec étudie déjà les mesures à prendre sur 55 tronçons routiers dans ce secteur.

Impacts appréhendés

Comme le prévoit le GIEC, l'un des impacts majeurs des changements climatiques, au cours des prochaines décennies, serait l'augmentation de l'érosion côtière en raison du rehaussement du niveau de la mer et de l'amplification des vagues et des tempêtes associées à l'activité cyclonique.

Cela rejoint un phénomène planétaire où 70 % des plages qui représentent un tiers du littoral mondial sont en recul (Bird, 1985). La remontée de la mer aura aussi pour effet de submerger les basses terres le long de la côte telles que les barachois et les flèches littorales et pourrait détruire graduellement les marais côtiers. Le Québec, qui fait déjà face à des problèmes importants d'érosion côtière, sera sérieusement touché par ce phénomène.

De plus, le réchauffement pourrait amener une diminution de la période d'englacement, qui assure une protection des côtes durant l'hiver et ainsi accroître l'effet des tempêtes hivernales sur le littoral. L'amplification du cycle gel/dégel, qui contribue à l'érosion des falaises meubles et rocheuses, s'ajouterait à ces autres facteurs. Ainsi, sur les falaises meubles de la Côte-Nord, un dégel soudain en plein hiver pourrait provoquer des glissements de surface amenant un recul rapide de la côte.

Le rehaussement de la mer correspondant aux augmentations de température des scénarios SRES de la figure 7 serait de l'ordre de 30 à 50 cm vers la fin du siècle en cours. La fréquence des tempêtes hivernales semble être en hausse depuis une trentaine d'années pour l'hémisphère Nord, mais on ne connaît pas encore ni la fréquence ni l'importance de ces tempêtes ou de l'activité cyclonique pour les prochaines décennies. De plus, au niveau local, le rehaussement du niveau de la mer se conjugue avec des mouvements géophysiques qui viendront en modifier les effets. À cet égard, le Québec fait face à deux situations contrastées : un rehaussement isostatique sur l'est-est de la rive Nord du Saint-Laurent et un abaissement dans certaines zones de la Gaspésie et des Îles de la Madeleine.

L'accentuation de l'érosion côtière aurait des impacts importants sur les populations concernées, notamment en coûts d'infrastructures municipales et routières, mais aussi en dommages aux propriétés résidentielles et commerciales situées au bord de la mer. À titre d'exemple, l'évaluation des impacts sur l'Île-du-Prince-Édouard fait état de la perte de 10 % de la valeur des propriétés sur 20 ans et de 50 % sur 100 ans. Des risques accrus pour la sécurité des habitants de ces régions sont aussi à envisager.

Stratégies d'adaptation

L'analyse de l'ensemble des phénomènes constitue un préalable essentiel à toute stratégie d'adaptation. À cet égard, une meilleure connaissance de la géomorphologie des côtes et des processus littoraux est nécessaire afin d'établir un diagnostic précis et de recommander des stratégies d'adaptation appropriées à chacune des situations. Ces études devraient par la suite être combinées avec les analyses sur la force des vents, les niveaux d'eau, les courants, l'amplitude des vagues, la force des tempêtes et les périodes d'englacement, afin d'établir plus précisément les niveaux de risques.

Les questions d'érosion au Québec n'ont jamais fait l'objet d'un suivi attentif et de campagnes de mesures spécifiques. Les données sur les niveaux de la mer sont nombreuses, mais incomplètes, et visaient jusqu'à ce jour essentiellement à répondre aux besoins de sécurité pour la navigation ou encore à documenter des projets d'amélioration d'infrastructures portuaires. L'absence d'analyses de récurrence des tempêtes constitue une lacune majeure pour la conception des ouvrages de protection.

De plus, les phénomènes liés à la réduction de la période d'englacement, qui est apparue récemment, sont peu documentés en raison de leur caractère nouveau. Enfin, l'activité cyclonique qui engendre de fortes tempêtes, dont l'augmentation aussi est nouvelle, n'est pas non plus documentée. Les seuls instruments de mesure dont on dispose actuellement dans le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent sont deux marégraphes et une bouée.

Des stations de mesures météorologiques donnant la force des vents, les niveaux d'eau, les courants, l'amplitude des vagues et autres données sont à mettre en place dans un nombre suffisant d'endroits stratégiques pour couvrir l'ensemble de l'estuaire et du golfe. L'ensemble de ces données sera ensuite utilisé pour valider les modèles qui prédisent les vagues responsables de l'érosion à partir des modèles de simulation climatique.

Une fois les niveaux de risques établis les stratégies qui s'offrent comprennent :

- le retrait des bâtiments et des infrastructures qui consiste à laisser la nature modeler les rivages de façon naturelle. Cette stratégie implique des déplacements qui peuvent s'avérer coûteux ;
- la protection par l'empierrement, les brise-lames et autres ouvrages de même type. Il s'agit souvent de solutions également coûteuses, surtout si l'on considère les coûts d'entretien et les impacts insidieux sur les secteurs adjacents. En effet, un ouvrage de protection protège une zone d'érosion souvent au détriment des secteurs adjacents, qui sont ainsi privés d'apports sédimentaires essentiels à leur maintien ;
- un zonage approprié et un développement qui tiennent compte des processus d'érosion – option qui s'appuie sur une bonne connaissance des milieux et une appréciation juste des vulnérabilités. Probablement la moins coûteuse à long terme, cette approche est évolutive et doit tenir compte du développement des connaissances, afin de réévaluer la situation à mesure que progresse l'érosion du littoral.

Les questions particulières aux zones côtières les plus sensibles du Canada atlantique, de la Colombie-Britannique, de l'Arctique et de l'Ontario ont été abordées dans le cadre des chapitres régionaux de l'Étude pancanadienne sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique. Plus récemment, une étude (McCulloch, M.M. *et al.*, 2002) des conséquences économiques de l'augmentation des inondations sur les propriétés et les infrastructures urbaines a été réalisée pour la ville de Charlottetown, où le niveau de la mer s'est relevé de 32 cm depuis 1911. Celle-ci constitue un bel exemple de travaux qui permettraient de mieux évaluer les impacts des changements climatiques et de déterminer les stratégies à mettre en œuvre. Pour le Québec, on ne dispose pas à l'heure actuelle d'études aussi complètes. Cependant une étude d'ensemble des vulnérabilités pour la Côte-Nord a été entreprise conjointement par six ministères québécois à cette fin et devrait être disponible au cours de la prochaine année.

LA RÉGION SUD DU QUÉBEC

Sise dans la plaine du Saint-Laurent et les Appalaches, la région du Sud du Québec qui recouvre moins de 10 % du territoire et accueille plus de 90 % de la population, s'étend sur plus de 500 km au sud de 50° N. Dans cette région à forte densité de population et aux activités économiques diversifiées, l'agriculture, le tourisme, les transports terrestre et maritime, la demande d'énergie, la gestion de l'eau, la santé, les habitats humains et les écosystèmes sont autant de domaines qui seront touchés directement et indirectement par les changements climatiques.

L'AGRICULTURE

Dans cette partie du Québec, les changements climatiques risquent d'affecter en premier lieu les activités de l'industrie agricole. En effet, le Sud du Québec est la région où la saison de croissance est la plus longue et donc la plus propice à un usage agricole. Cet avantage est amplifié par la présence d'un relief plat et de terres fertiles.

Les changements climatiques auront des effets variés, directs et indirects, sur la production agricole pouvant toucher à la fois la quantité et la qualité des produits. Les impacts varieront considérablement selon les types d'activités agricoles – culture céréalière, plante fourragère, arbres fruitiers, horticulture ou élevage. Ces modifications pourraient avoir des conséquences sur la rentabilité de l'industrie agricole en fonction des stratégies d'adaptation qui seraient adoptées.

Impacts appréhendés

Les effets directs

Tel qu'exposé au chapitre 1, le scénario moyen des conditions climatiques prévues pour la période 2080 à 2100 pour le territoire agricole du Québec, comprend par rapport à la

période 1960-1990, une augmentation de température variant de 2 à 3 °C en été et de 3 à 4 °C en hiver, ainsi qu'une hausse des précipitations de moins de 5 % en été et de 10 à 20 % en hiver. Ces changements climatiques entraîneraient probablement une prolongation de la saison de croissance de plusieurs cultures mais aussi une augmentation de l'évapo-transpiration des sols. Les principaux impacts pourraient être reliés davantage aux changements dans la fréquence des événements seuils et extrêmes (par exemple, la date du dernier gel au printemps ou des pluies de forte intensité) qu'aux changements dans les moyennes climatiques.

La saison de croissance, déterminée principalement par la période sans gel, s'avère un facteur agroclimatique fondamental qui définit le potentiel de production agricole. Selon une étude de modélisation (de Jong *et al.*, 2001), sous une atmosphère deux fois plus riche en CO₂, la saison de croissance pour le maïs dans la région de Saint-Hyacinthe pourrait s'allonger de presque 20 jours alors que celle des pommes de terre s'allongerait d'environ 12 jours dans la région du Lac-Saint-Jean. Toutefois, ces études ne prévoient pas de prolongation significative de la saison de croissance du blé et de l'orge. Cela s'explique en partie par le fait que, malgré une date d'ensemencement plus hâtive, les récoltes seraient également devancées.



On a déjà observé au Québec, pendant les années relativement chaudes de 2001 et 2002, que certaines cultures à la limite nordique de leur zone d'adaptation au climat ont profité de la saison de croissance prolongée. Notamment, la culture de la vigne a connu une hausse au niveau de la quantité et de la qualité du raisin. Par contre, les périodes de canicule peuvent nuire à la production et à la qualité de plusieurs cultures maraîchères telles que les laitues et les choux.

Les besoins de chaleur et de froid conditionnent la croissance et la survie hivernale des plantes pérennes. Dans le cas des plantes fourragères, des études de modélisation suggèrent que des automnes plus doux et une couverture de neige moindre pourraient nuire à leur survie hivernale, même si une plus longue saison de croissance permettrait un plus grand nombre de récoltes (Bélanger *et al.*, 2002a). Selon ces mêmes scénarios, les arbres fruitiers profiteraient probablement des meilleures conditions d'endurcissement et subiraient moins de dommages causés par le froid (Bélanger *et al.*, 2001). Par contre, on a observé que la chaleur automnale des dernières années peut avoir comme effet de diminuer la qualité des pommes en retardant leur rougissement.

Puisque ces scénarios climatiques ne prévoient pas de hausse importante des précipitations estivales accompagnant le réchauffement prévu, le déficit hydrique (évapotranspiration potentielle moins les précipitations saisonnières) devrait alors augmenter. Les journées de stress hydrique pour le maïs et le soya au Québec pourraient augmenter d'environ 20 jours (de Jong *et al.*, 2001). On a noté que, même s'ils ont été généralement bons malgré des périodes de sécheresse importantes, les rendements de maïs en 2001 et en 2002 auraient été désastreux si les pluies avaient été retardées de quelques jours seulement.

Enfin, la concentration atmosphérique de CO₂ influe directement sur la croissance des cultures. Des expériences (Hunt, R. *et al.*, 1991 ; Ziska *et al.*, 2001 ; Sionit *et al.*, 1984) indiquent qu'une augmentation de la concentration de CO₂ améliore l'efficacité de l'utilisation de l'eau par les plantes et stimule la photosynthèse, à condition que d'autres facteurs (eau et éléments nutritifs du sol) ne soient pas limitatifs. Certaines cultures, comme le soya, réagissent davantage à un enrichissement en CO₂ que d'autres, le maïs par exemple.

Les animaux, surtout ceux élevés à l'intérieur de bâtiments (tels les porcs et les volailles), seraient exposés plus fréquemment aux stress thermiques d'été. Leur santé et leur taux de croissance pourraient en être affectés (Myer et Bucklin, 2002). Mentionnons à titre d'exemple la vague de chaleur au début de juillet 2002, qui a causé la perte d'au moins 500 000 volailles au Québec. Même si les éleveurs ont introduit de nouvelles technologies pour améliorer leurs systèmes de ventilation,

cela n'a pas été suffisant pour empêcher la température d'atteindre presque 35 °C dans plusieurs bâtiments d'élevage. Par contre, des conditions hivernales moins rigoureuses pourraient permettre un meilleur taux de gain pour les bovins de boucherie élevés en plein air.

Les effets indirects

La température et l'humidité jouent des rôles déterminants dans la distribution géographique des mauvaises herbes, des agents pathogènes et de l'entomofaune agricole. Sous de nouvelles conditions climatiques, on s'attend à l'arrivée de nouvelles espèces et à des changements dans les populations ennemies des cultures. Une plus grande variabilité des températures et des précipitations aurait des impacts à la fois positifs et négatifs sur les interactions hôtes/parasites. Des efforts supplémentaires seraient nécessaires pour s'assurer que les systèmes de prévision des maladies et des insectes ravageurs des cultures soient efficaces sous des conditions climatiques plus variables.

Si la survie de certains insectes serait favorisée par des hivers plus doux (par exemple, les pucerons), une réduction de la couche de neige protectrice pourrait être néfaste pour d'autres (comme les chrysomèles). Des températures estivales plus élevées pourraient augmenter le nombre de générations par année dans le cas des tétranyques et de la pyrale du maïs. De nouvelles conditions atmosphériques pourraient également engendrer un risque plus élevé d'invasion des espèces migrantes. Signalons que l'été chaud de 2001 semble avoir favorisé la prolifération de la chenille de la légionnaire uniponctué, généralement peu commune, causant des dommages aux cultures céréalières et fourragères du sud-ouest du Québec.

Les mauvaises herbes des cultures sont souvent des espèces capables de s'adapter et de se disperser rapidement ; leur répression peut donc devenir plus difficile sous des conditions de climat plus variables. Une augmentation de température et une irrégularité de l'apport d'eau pourraient rendre certaines cultures maraîchères plus sensibles à des désordres physiologiques, comme la brûlure de la pointe associée à une carence en calcium dans la laitue. Certaines maladies parasitaires, telles les maladies causées par les bactéries, pourraient être favorisées par des températures et une humidité plus élevées.

Des saisons plus chaudes et plus sèches auraient un impact sur la persistance des pesticides dans les sols. De plus, une hausse de la fréquence des précipitations d'intensité extrême risque d'aggraver le potentiel d'érosion des sols. Ces faits, combinés au besoin accru en irrigation pour certaines cultures, pourraient exacerber la pression sur la qualité de l'eau.

Bien que les facteurs climatiques directs et indirects soient déterminants pour la production agricole, les impacts économiques sont aussi fortement influencés par les prix. Or dans bien des cas, ces prix sont fonction de l'offre et de la demande mondiales, qui sont aussi fortement tributaires des facteurs climatiques. Bref, l'impact économique des changements climatiques sur le secteur agroalimentaire québécois sera, dans une certaine mesure, le résultat des impacts des changements climatiques au Québec par rapport à ceux observés ailleurs.

Stratégies d'adaptation

La production agricole est liée aux conditions climatiques locales ; par conséquent, en choisissant des stratégies d'adaptation appropriées, les producteurs devraient pouvoir réduire leurs risques et bénéficier des occasions de profits associés aux changements climatiques. Les pratiques de culture et les stratégies financières devront cependant être adaptées de manière à affronter la perspective d'une variabilité climatique plus grande.

De façon générale, les producteurs agricoles estiment posséder les outils technologiques pour faire face aux changements climatiques (Bryant *et al.*, 2000), notamment en ce qui concerne le choix de cultivars et de cultures. En effet, les cultivars de maïs et de soya, par exemple, déjà utilisés chez nos voisins du sud sont disponibles dès maintenant pour les producteurs du Québec. Selon certains auteurs, l'introduction d'espèces telles que le mil, pourrait diminuer le risque de pertes hivernales des luzernières (Bélanger *et al.*, 2001). Ils notent d'ailleurs que dans le cas des espèces dont le temps d'établissement est long (comme les arbres fruitiers), il faudrait réévaluer plus souvent la distribution géographique des risques agroclimatiques afin de bien planifier l'introduction d'autres cultivars ou espèces. Enfin, les milieux de recherche agricole auraient à développer des cultivars plus tolérants aux variabilités accrues des conditions de température et d'humidité.

Le niveau des intrants pourrait également être ajusté ; en production végétale, on observe souvent sous des conditions de stress hydrique, un meilleur rendement économique lorsque sont utilisées des doses d'engrais inférieures aux recommandations générales. Aussi, en réponse à une évolution éventuelle des ennemis des cultures, il faudrait développer de nouveaux produits de phytoprotection respectueux de l'environnement. En raison d'un plus grand potentiel d'érosion des sols, dans certaines situations, l'utilisation d'engrais verts semés après les récoltes deviendrait encore plus souhaitable. Une plus longue saison de croissance pourrait même favoriser leur implantation.

Il faudra tenir compte de l'évolution du climat au moment de considérer certains investissements à long terme – notamment, pour les systèmes d'irrigation ainsi que pour la conception des bâtiments destinés à la production animale. Il pourrait s'avérer nécessaire de mettre au point de nouveaux systèmes de refroidissement pour les bâtiments d'élevage. Déjà, certains producteurs de lait appliquent une peinture céramique blanche sur le toit de leur étable afin d'en réduire la conductivité thermique.

Plusieurs politiques et programmes gouvernementaux ont été conçus pour aider à gérer les risques en agriculture. En raison des risques accrus appréhendés, ces programmes pourraient devoir être révisés plus fréquemment. Dans l'avenir, les services de prévision de météorologie agricole seront encore plus essentiels.

Les impacts des changements climatiques sur le secteur agroalimentaire seront surtout ressentis au niveau local, alors que les connaissances dont on dispose sont à l'échelle globale. Le raffinement des modèles climatiques sur le plan régional nous permettra de mieux cibler les effets négatifs et les nouveaux potentiels de production propres à chaque région. Les recherches de nature biophysique, liant les modèles climatiques à la production agricole, fournissent des éléments de réflexion pour l'avenir du secteur agricole sous une atmosphère à plus forte concentration de CO₂. Néanmoins, ces études peuvent difficilement cerner toute la complexité des liens étroits entre le climat, les plantes, les animaux, les sols, les maladies, les insectes et la production agricole.

En attendant le développement des modèles régionaux du climat pour le Québec, il sera important d'étudier en détail la vulnérabilité, les risques et la capacité d'adaptation du secteur agroalimentaire aux aléas climatiques actuels.

La préservation des écosystèmes et de la biodiversité est l'une des préoccupations majeures liées aux changements climatiques¹¹. Plus encore que les économies et les milieux humains qui, grâce aux technologies, sont capables de s'adapter aux changements de toutes natures, les milieux naturels risquent d'être frappés par la rapidité et l'ampleur des changements. Tant sur le plan des mesures pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre que celui des mesures relatives aux changements d'affectations des terres et à la foresterie, la *Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques* aura un impact direct sur la conservation de la biodiversité¹².

Au Québec, on compte au moins 40 866 espèces végétales et animales. Le patrimoine végétal québécois (algues, lichens, hépatiques, mousses, prêles, lycopodes, fougères, conifères et plantes à fleurs) comprend plus de 7 000 espèces. Considérés à part, les champignons comptent quelque 2 500 espèces pour la seule catégorie des champignons supérieurs.

Quant à la faune sauvage, elle réunit 653 espèces – soit 199 espèces de poissons, 21 espèces d'amphibiens, 16 espèces de reptiles, 326 espèces d'oiseaux et 91 espèces de mammifères. À cette variété s'ajoutent de nombreuses espèces d'invertébrés. Les insectes représentent à eux seuls plus de 25 000 espèces. Cette diversité étonnante, sans être comparable à celle des contrées les plus méridionales, s'explique par la grande variété d'écosystèmes d'un immense territoire traversé par trois zones climatiques.

La zone arctique (environ 15 % du territoire) présente une faible diversité biologique, mais les espèces qui y sont présentes sont très rustiques. Celles-ci revêtent une importance particulière en raison de leur rôle dans le mode de vie des communautés autochtones où la pêche et la chasse occupent encore une place très importante.

Plus au sud, les espèces de la vaste zone boréale (plus de 70 % du territoire) sont également relativement peu nombreuses. Ici aussi, leur importance est accrue en raison de leur rôle dans le mode de vie des autochtones, notamment en ce qui concerne la chasse aux oiseaux migrateurs et la pêche de plusieurs espèces de poissons. Dans la pessière à mousse, au sud du 52^e parallèle, la faune et la flore sont plus riches, et on y utilise de façon plus soutenue les ressources biologiques.

Enfin, tout au sud, la zone tempérée nordique (environ 13 % du territoire), présente une grande diversité biologique. Au cours des siècles, cette richesse a d'ailleurs favorisé l'occupation

humaine créant de larges superficies agricoles et urbaines. C'est également cette zone que traverse le Saint-Laurent, hôte de diverses espèces aquatiques.

Impacts appréhendés

Les changements climatiques appréhendés au cours des cent prochaines années auront différents effets sur les écosystèmes et sur la biodiversité. Bien qu'ils aient un potentiel d'adaptation aux stress naturels, les organismes vivants pourraient être durement touchés par l'ampleur du changement, principalement dans les régions les plus nordiques.

Si les concentrations de CO₂ doublient, plusieurs populations ou même plusieurs espèces d'animaux et de plantes pourraient disparaître en raison de changements climatiques excédant leurs capacités migratoires et de la perte ou de la diminution de l'aire des habitats. La combinaison de l'augmentation de la température et des autres stress environnementaux, notamment la perte d'habitats, pourrait facilement rompre les liens écologiques unissant les espèces interdépendantes et entraîner des réorganisations à l'intérieur des communautés biologiques. Ces nouvelles communautés adaptées aux changements climatiques pourraient être moins diversifiées que celles qu'elles remplaceront (Root *et al.*, 2003).

En plus d'imposer des migrations sans précédent, le réchauffement causerait probablement des pertes importantes d'habitats. Plus de la moitié du territoire du Québec est à risque. Il est impossible de prédire si les habitats détruits seront remplacés par de nouveaux types d'habitats aussi diversifiés ou si des habitats semblables pourront s'implanter ailleurs. Enfin, il y aurait une réduction de l'aire d'habitats spécifiques à l'intérieur d'habitats qui auraient survécus. Dans les habitats arctiques et montagneux les plus vulnérables, jusqu'à 20 % des espèces locales pourrait disparaître.



11 Il est d'ailleurs révélateur que la *Convention sur la diversité biologique* ait été signée en même temps que la convention sur les changements climatiques au Sommet de la terre en 1992, à Rio de Janeiro, au Brésil.

12 Selon la *Convention sur la diversité biologique*, la diversité biologique est la « variabilité des organismes vivants de toute origine y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie ; cela comprend la diversité au sein des espèces et entre espèces ainsi que celle des écosystèmes ».



Milieux terrestres

En ce qui concerne les espèces fauniques, les hausses de température pourraient causer un stress thermique durant l'été, tant dans le Nord que dans le Sud du Québec, alors que l'ampleur et la durée des périodes caniculaires iraient en augmentant. Cela pourrait inciter certaines espèces à quitter leur aire d'habitat privilégiée, alors que d'autres espèces indigènes ou exotiques y seraient attirées. Pour certaines espèces capables de migrer rapidement, cela conduirait à un agrandissement ou un déplacement de leurs aires d'habitat vers le nord. Plusieurs espèces animales pourraient migrer avant les végétaux. Cependant, l'établissement de la plupart des espèces animales dépendra de la présence d'une flore appropriée et d'autres éléments modelant les habitats nécessaires à leur survie. Si la plupart des espèces réussissent à peupler graduellement des franges de territoire, rares seraient celles qui réussiraient rapidement à s'installer sur une vaste étendue.

Dans leur migration, les espèces du sud empièteront sur le territoire plus au nord. Lorsque la compétition sera trop forte, certaines espèces ou populations pourront migrer encore plus au nord, tandis que d'autres ne le pourront pas. Ainsi, les aires de distribution respectives des cerfs de Virginie et des orignaux pourraient s'étendre vers le nord, alors que celle des caribous des forêts se rétrécirait, notamment en raison de l'absence ou de la rareté du lichen arboricole qui leur sert de nourriture. Les caribous des forêts et les orignaux entreraient en compétition pour cette nourriture. L'arrivée de l'orignal serait inévitablement suivie d'une augmentation des populations de loups. Principal prédateur naturel de l'orignal, le loup pourrait aussi chasser les caribous de ce territoire nouvellement investi.

Les changements climatiques entraîneraient une réduction de la durée de la saison avec couverture de glace et une moins grande expansion des glaces de mer, ce qui pourrait s'avérer néfaste pour certaines espèces fauniques des régions nordiques et du golfe du Saint-Laurent – tels les ours blancs, les phoques du Groenland et les phoques gris. Ces derniers, qu'on peut observer en hiver sur les glaces du golfe, se reproduisent en moins grand nombre en absence de glace (Gagné, Jacques, 2000).

Des précipitations liquides ou verglaçantes, survenant durant des périodes de redoux hivernal, pourraient causer des problèmes à la faune et la flore riveraines par suite de crues ou d'inondations. Certaines espèces pourraient ne pas pouvoir se nourrir suffisamment en raison du recouvrement de leurs sources de nourriture par une couche de glace.

Malgré l'augmentation projetée des précipitations, la fraction nivale devrait décroître dans un contexte de changements climatiques. Alors que des plantes souffriront de la perte de la couche protectrice que forme la neige, certaines espèces de la grande faune pourraient être favorisées par une diminution de la fraction nivale. On sait que plus la neige au sol est épaisse, moins elle est compacte et plus elle reste longtemps, plus cette neige nuit au déplacement des cerfs de Virginie. Il s'ensuit une augmentation du taux de mortalité au sein des populations de cerfs.

Milieux aquatiques

On trouve au Québec quelques espèces fauniques parmi les plus à risque : les oiseaux migrateurs qui utilisent les milieux humides côtiers et les milieux arctiques, les amphibiens et les reptiles de même que les espèces qui se servent des glaces arctiques. En raison de la baisse des niveaux d'eau et des hausses de température de l'eau qui pourraient en découler, notamment pour le Saint-Laurent, les changements climatiques rendent les écosystèmes aquatiques et les milieux humides particulièrement vulnérables.

Au chapitre des habitats fauniques, on pourrait assister à la perte d'habitats naturels et aménagés pour un grand nombre d'espèces, dont plusieurs sont sensibles ou menacées – brochet d'Amérique, tortue géographique, râle jaune, troglodyte à bec court, musaraigne pygmée (Beaulieu, H. et Huot, M., 1993) – et d'autres qui présentent un grand intérêt économique – perchaude, poulamon, anguille d'Amérique, sauvagine, canard pilet, sarcelle à ailes bleues, poule d'eau (Langlois, C. *et al.*, 1992). Des chercheurs ont établi un lien entre le débit et la température, d'une part, et l'abondance par classes d'âge de l'esturgeon jaune de la rivière des Prairies, d'autre part. Ils ont aussi fait ressortir la vulnérabilité de la carpe à la chaleur durant la période de frai (Mingelbier *et al.*, 2001). Des études sont en cours pour évaluer le degré de vulnérabilité du saumon à la chaleur.

Les changements climatiques pourraient perturber les synchronismes entre les événements marquant le cycle biologique de certaines espèces et les conditions climatiques rendant le milieu propice à leur survie. Le grand brochet, par exemple, qui se reproduit dans les plaines inondées, souffrirait de dégels hâtifs causant la formation de plaines inondées trop froides pour permettre sa reproduction.

En ce qui concerne les tributaires du Saint-Laurent, des variations de débit annuel de l'ordre de 10 % (soit dans les limites de la variabilité actuelle) ne devraient pas provoquer de situations aussi difficiles que celles que risquent de connaître les écosystèmes et les espèces associés au fleuve.

Par ailleurs, les changements climatiques engendreraient une hausse du niveau moyen des océans. Cette situation provoquerait une augmentation de la salinité de certains secteurs du Saint-Laurent et de l'embouchure de ses tributaires, où l'eau est actuellement saumâtre ou douce. La faune et la flore aquatiques et celles des milieux humides en subiraient diverses perturbations : menace pour leur alimentation ou leur survie, migrations d'espèces et d'habitats ainsi qu'émergence de nouveaux parasites et maladies (Dumas, 1989 ; Commission mixte internationale, 1993).

L'immersion de certaines parties d'écosystèmes terrestres pourrait aussi avoir des incidences sur la faune et la flore, leurs habitats se trouvant dorénavant en milieu inondé. L'érosion côtière, qui serait aggravée par des tempêtes plus fréquentes dans un contexte de changements climatiques, constituerait un facteur défavorable supplémentaire pour ces écosystèmes.

Par ailleurs, les changements climatiques affecteraient la stratification thermique des eaux du golfe du Saint-Laurent. Lorsque la couche intermédiaire de l'eau (la plus froide) se refroidit, comme depuis le milieu des années 1980, le crabe des neiges se reproduit en plus grand nombre, alors que la condition et la fécondité de la morue se détériorent. Un réchauffement des eaux du golfe apparaît donc à première vue défavorable au crabe des neiges, mais favorable à la morue. Cependant les modèles climatiques ne nous permettent pas encore de déterminer l'évolution probable de la stratification thermique du golfe pour les décennies à venir.

Stratégies d'adaptation

Les multiples effets des changements climatiques sur les écosystèmes et la diversité biologique à l'échelle régionale, voire locale, sont encore relativement peu connus et complexes à évaluer. Des interactions variées entre les composantes climatiques et d'autres facteurs, dont ceux où l'intervention humaine joue souvent un rôle hautement perturbateur, influent fortement sur l'évolution des écosystèmes ainsi que sur le développement et à la répartition des espèces. Des actions comme la pêche commerciale intensive, le dragage de la voie maritime, le reboisement avec un nombre restreint d'espèces et l'extension des villes ou des zones agricoles ne sont que quelques exemples des effets négatifs de l'activité humaine sur l'environnement. Des connections entre les habitats naturels au sein des aires développées pourraient aider les espèces à atteindre leur taux intrinsèque de migration maximal et ralentir la disparition des espèces (Pearce, F., 1998 ; Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique, 2002 ; Environnement Canada, 2002 ; Stachowicz, J. J. *et al.*, 2002 ; Malcolm, J. R. et Markham, A., 2000 ; Ministère de l'Environnement, 2002 b).

On peut s'interroger sur la capacité d'adaptation aux changements climatiques d'espèces ou de milieux déjà sous stress en raison des contraintes imposées par l'activité humaine. Les stratégies d'adaptation devront tenir compte du stress accru par les changements climatiques. Parmi les écosystèmes terrestres, le milieu agricole en est un où l'évolution de secteurs restés à l'état naturel et des habitants qui les peuplent pourrait être mise à rude épreuve. Le paysage et les pratiques agricoles se sont considérablement modifiés au cours des dernières décennies, occasionnant une réduction des superficies laissées à l'état naturel et des espèces. Il sera difficile de distinguer les effets liés aux changements climatiques de ceux induits par l'activité humaine. Changer certaines pratiques agricoles pour mieux s'adapter aux changements climatiques ou réduire les émissions de GES pourrait avoir des répercussions sur les milieux naturels et leurs habitants qu'il faudra évaluer.

Au Québec, comme ailleurs, un nombre croissant d'espèces exotiques conquièrent de nouveaux espaces en empruntant des voies liées aux activités humaines. Importés intentionnellement ou comme « voyageurs clandestins », les organismes qui réussissent à survivre dans leur nouvel habitat créent parfois des impacts écologiques et économiques graves, pouvant prospérer au détriment de certaines espèces indigènes et parfois même les supplanter. Une étude récente (Stachowicz *et al.*, 2002) sur les espèces marines côtières suggère que le réchauffement planétaire aide les espèces exotiques envahissantes à s'établir dans de nouveaux territoires et contribuerait à accélérer l'homogénéisation des écosystèmes du monde. Les mesures visant à maîtriser l'introduction de nouvelles espèces auront donc de l'importance dans ce contexte.

Le Saint-Laurent est l'un des fleuves les plus importants d'Amérique du Nord. Il prend sa source dans les Grands Lacs, aboutit à un vaste estuaire de plus de 65 km de largeur et se jette dans l'océan Atlantique. Parsemé de plus de 500 îles, il s'élargit en plusieurs lacs peu profonds et s'étire dans des herbiers et des marais, inondant des forêts riveraines. Bassin de drainage de presque tous les cours d'eau du Québec situés en régions habitées, il compte plusieurs dizaines d'affluents qui en doublent le débit entre les Grands Lacs et l'estuaire.

Véritable brèche menant droit au cœur de l'Amérique du Nord, le Saint-Laurent marque la frontière entre les États-Unis et le Canada sur environ 200 km. Il constitue l'une des plus grandes voies navigables du monde et le principal axe fluvial du continent nord-américain. Au Canada, il est aménagé pour la navigation sur tout son cours, formant ainsi la Voie maritime du Saint-Laurent inaugurée en 1959. En reliant l'océan Atlantique et le vaste bassin des Grands Lacs, la voie maritime ouvre un parcours navigable de 3 800 km et met en contact les grands centres industriels du Canada et des États-Unis, de même que les Prairies plus à l'ouest.

Les données issues des réseaux hydrométriques du bassin versant du Saint-Laurent mettent en relief le comportement cyclique de l'hydraulicité du fleuve. La figure 20 (Morin, J. et al.,

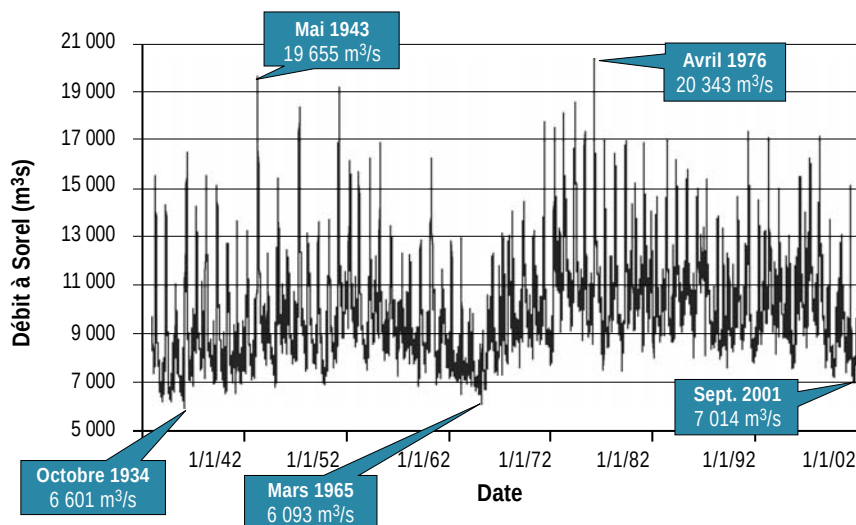
2000) illustre l'évolution du débit mensuel à Sorel pour la période 1932-2001. Examinée dans son ensemble, cette série de données sert à apprécier l'ampleur des fluctuations du débit – de quelque 14 000 m³/s, soit de 6 000 m³/s à 20 000 m³/s. Bien qu'elles soient très peu élevées, les valeurs mesurées au cours de l'été 2001 s'inscrivent dans la plage de valeurs mesurées depuis une centaine d'années.

Si on retient le scénario moyen exposé au chapitre 1 d'une augmentation de température de 2 à 3 °C en été et de 3 à 4 °C en hiver, accompagnée d'une hausse des précipitations de moins de 5 % en été et de 10 à 20 % en hiver, on pourrait assister à une réduction potentielle des débits moyens sortants du lac Ontario de quelque 24 % à cause de l'évaporation accrue due à la hausse des températures. Cette hypothèse est toutefois incertaine et varie selon les études. En effet, les débits sortants du lac Ontario pourraient être réduits d'environ 24 % ou augmentés d'environ 8 % au cours des cent prochaines années (Lofgren *et al.*, 2002). D'autres résultats obtenus de l'application des modèles de circulation générale (Mortsch *et al.*, 2000) suggèrent une réduction pouvant aller jusqu'à 40 % des débits sortants du lac Ontario, en raison notamment du réchauffement des températures en hiver, où le couvert de glace des Grands Lacs serait fortement réduit amenant une plus grande évaporation.

Figure 20

Débit du Saint-Laurent à Sorel, décembre 1932-décembre 2001

(Morin, J. et al., 2000)



Les apports principaux : l'Outaouais et les Grands Lacs

Le Saint-Laurent est alimenté par deux principaux bassins qui sont régularisés : les Grands Lacs et la rivière des Outaouais. Le premier et le plus important a un débit moyen annuel de 7 060 m³/s avec des variations entre 6 000 à 9 000 m³/s. Le second enregistre des fluctuations encore plus importantes avec un débit allant de 1 000 à 8 000 m³/s au printemps. Sans les travaux de régularisation, les fluctuations du Saint-Laurent et de la rivière des Outaouais seraient encore plus prononcées.

De manière générale, la régularisation des eaux réduit les débits au printemps et les augmente à l'automne et à l'hiver. En moyenne, on réduit les débits au maximum d'environ 2 000 m³/s au printemps et on les augmente de 300 à 900 m³/s entre septembre et mars. Bien que l'effet typique de la régularisation semble important, la marge de manœuvre réelle dont on dispose pour éviter les épisodes extrêmes est en fait beaucoup plus limitée. Par exemple, en période prolongée de faible hydraulicité, le niveau des Grands Lacs diminue tellement qu'il est très difficile de combler le manque d'eau en aval sans aggraver une situation déjà problématique en amont. Même chose pour la prévention des inondations au cours d'épisodes de forts débits.

Crues et étiages

L'examen des débits mesurés depuis le début des années 1960 révèle que le débit annuel moyen du Saint-Laurent à la hauteur de Sorel est à peu près de 9 500 m³/s, avec des fluctuations saisonnières comprises entre les seuils de 20 300 m³/s et de 6 090 m³/s. Dans un scénario de changements climatiques selon lequel le débit moyen du fleuve diminuerait d'environ 24 %, on pourrait s'attendre à un débit annuel moyen d'un peu plus de 7 000 m³/s. Une telle diminution du débit provoquerait à certains endroits une baisse du niveau du Saint-Laurent qui pourrait atteindre près de 1 m (Morin, J. *et al.*, 2000).



Impacts appréhendés

Les impacts reliés aux changements climatiques et à la diminution des débits du Saint-Laurent, qui s'ensuivraient sont de différentes natures et touchent à la fois la période et l'importance des crues, l'assèchement des zones aquatiques et des plaines d'inondation, la réduction des approvisionnements en eau de certaines municipalités et la navigation commerciale et de plaisance sur le Saint-Laurent.

Cycle hydrologique

Dans le Sud du Québec, les températures plus élevées en hiver et les précipitations plus abondantes sur les bassins versants des tributaires du fleuve pourraient occasionner une crue plus hâtive à débits plus élevés. C'est ainsi que la crue printanière de la rivière des Outaouais pourrait causer des problèmes d'inondation dans l'archipel de Montréal. En période estivale, l'évapotranspiration accrue dans les bassins versants comportant d'importants couverts forestiers pourrait accentuer la diminution des débits d'été. Sur les Grands Lacs, les hausses prévues de température pourraient augmenter l'évaporation, un phénomène potentiellement accentué en hiver si les couverts de glace sont réduits.

Sur les tributaires du Saint-Laurent, les températures plus élevées en hiver pourraient augmenter la fréquence des débâcles et des embâcles hivernaux. Certaines rivières, comme la Châteauguay, présentent une configuration propice à ce type d'événement dont la fréquence pourrait augmenter.

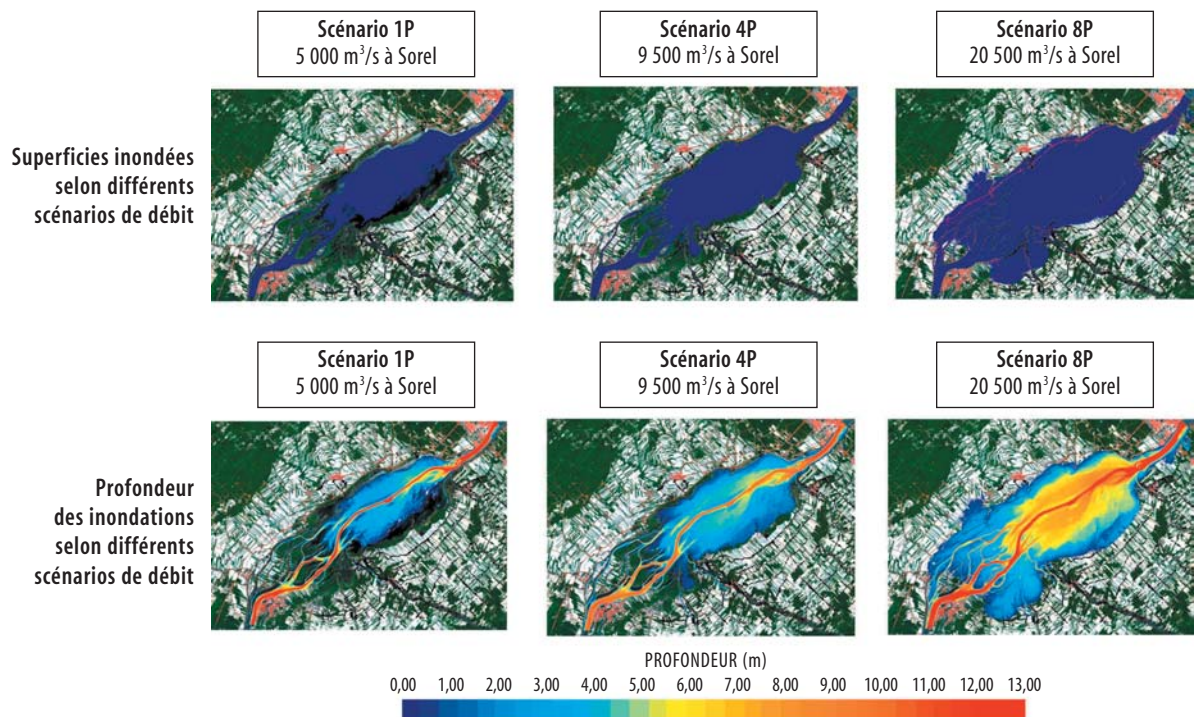
Assèchements, inondations, érosion et biodiversité

Dans un scénario où le débit moyen du Saint-Laurent est à la baisse, de larges secteurs actuellement constitués d'herbiers aquatiques pourraient se transformer en plaines d'inondation, recouvertes d'eau au moment de crues printanières ou de fortes pluies prolongées sur le bassin des Grands Lacs. Dans la mesure où de bons plans de gestion du territoire sont mis en œuvre, il serait moins à craindre que des développements urbains ou semi-urbains surgissent en zones inondables.

La figure 21 présente l'emprise de la plaine d'inondation du lac Saint-Pierre pour des débits de 5 000 m³/s, de 9 500 m³/s et de 20 500 m³/s, ainsi que les profondeurs associées. Des niveaux en moyenne plus bas réduiraient le taux de recul des talus actuellement en érosion. En contrepartie, les plates-formes côtières situées en bordure du chenal de navigation seraient soumises à un taux d'érosion vertical plus important, générant des charges sédimentaires accrues. On peut s'attendre aussi à ce qu'une baisse du niveau moyen du Saint-Laurent occasionne une modification de la configuration des deltas de certaines rivières comme la Yamaska et la Saint-François, toutes deux affluents du lac Saint-Pierre.

Figure 21

Emprise de la plaine d'inondation et profondeurs d'eau pour trois débits du Saint-Laurent (Morin, J. et al., 2000)



Sur le plan environnemental, il y a lieu de craindre les effets de la baisse du niveau d'eau sur les écosystèmes sensibles et riches qui bordent le fleuve en zones inondables. Les bas niveaux observés ces dernières années ont conduit à une prolifération des plantes terrestres opportunistes dans les zones asséchées de la plaine inondable du Saint-Laurent. À terme, ces plantes appauvriront la diversité biologique des écosystèmes du fleuve, car elles ne présentent aucun intérêt pour la faune existante – poissons, canards, amphibiens et reptiles (Garneau, 2000). De plus, on pourrait assister à des modifications de la végétation émergente et submergée ainsi qu'à une vulnérabilité accrue de la bande riveraine à la colonisation par des espèces végétales exotiques agressives ou indésirables (Hudon, 1997 ; Lehoux, 1996). À cet égard, le lac Saint-Pierre, réserve mondiale de la biosphère, est particulièrement vulnérable. Des marais aménagés ayant un impact majeur sur la production piscicole pourraient être affectés par la réduction des niveaux d'eau printaniers (Mingelbier *et al.*, 2000). Notons que la pêche commerciale et sportive est une activité importante dans plusieurs secteurs du Saint-Laurent. La réduction possible de la productivité du système pourrait mettre en péril la ressource et les usages qui en découlent.

Apports d'eau potable

Les questions relatives à l'eau potable sont traitées plus complètement dans la section intitulée « La gestion de l'eau ». Notons cependant que dans le Saint-Laurent des problèmes d'approvisionnement pourraient apparaître pour certaines municipalités dont la prise d'eau est située à une profondeur insuffisante.

Il faut aussi mentionner les municipalités qui s'alimentent en eau potable à même la rivière des Mille-Îles et qui ont été inquiétées à l'été 2001 et 2002 par une baisse de la qualité de l'eau causée par des débits très bas occasionnant une moindre dilution des charges polluantes. Cette rivière représente un cas particulier en raison de sa configuration. Elle prend sa source dans le lac des Deux Montagnes qui se déverse également dans le Saint-Laurent et la rivière des Prairies. Comme le seuil de l'entrée de la rivière des Mille-Îles est plus élevé que les autres exutoires, ses apports d'eau sont les premiers à être réduits, ce qui entraîne des réductions de débit encore plus importantes que pour l'ensemble du Saint-Laurent. On a dû augmenter le débit de la rivière des Outaouais pour améliorer la qualité de l'eau de cet exutoire du lac des Deux Montagnes. En conséquence, une centrale de production d'hydroélectricité a dû turbiner l'eau de cette rivière dans des conditions qui n'étaient pas les meilleures.

Une augmentation des températures de l'eau pourrait aussi amplifier la dégradation de la qualité de l'eau. Ce type de problèmes touchera particulièrement les municipalités dont les prises d'eau sont placées à l'intérieur d'emprises de panaches de sources d'eaux usées, telles que les émissaires municipaux et industriels.

Navigation de plaisance

Une baisse des niveaux d'eau le long du Saint-Laurent aurait potentiellement des impacts sur l'accessibilité des marinas ainsi que sur le type de bateau pouvant s'en approcher et s'y amarrer, étant donné la profondeur utile moindre des chenaux d'amenée et des bassins. On peut s'attendre à une perte de clientèle en fonction des types de bateaux de plaisance fréquentant les différentes marinas.

Transport maritime

Sur le plan économique, l'impact le plus grand des changements climatiques toucherait le transport maritime. En effet, une baisse des niveaux d'eau le long du Saint-Laurent et la réduction des profondeurs utiles dans le chenal de navigation affecteraient l'accès aux ports du Saint-Laurent et l'ensemble du trafic de la voie maritime. Le zéro des cartes (ZC) de référence utilisé dans la navigation pourrait être revu à la baisse. Certains navires commerciaux seraient dans l'obligation de réduire leur tonnage, occasionnant des pertes économiques aux armateurs. L'incertitude de ces derniers quant au dégagement sous quille dans le chenal de navigation pourrait nuire à la compétitivité du port de Montréal par rapport aux autres ports de la côte est de l'Amérique du Nord.

Stratégies d'adaptation

Inondations, assèchements et biodiversité

En ce qui concerne les inondations, les niveaux de récurrence de 20 ans et de 100 ans utilisés – et les limites juridiques qu'ils définissent en pratique – devraient être revus en fonction des nouvelles données pour tenir compte de débits en général plus faibles, mais comportant potentiellement une plus forte variabilité surtout au printemps. Des plans de zonage des rives et des plaines d'inondation exigeant une nouvelle réglementation seraient aussi requis pour limiter les impacts économiques négatifs.

En vue de prévenir la détérioration de la qualité de l'eau et de maintenir certains usages liés à la navigation, on pourrait plus souvent faire appel aux ouvrages de régularisation pour augmenter des débits en provenance des Grands Lacs ou des tributaires importants, comme la rivière des Outaouais en période d'étiage. Cela impliquerait toutefois des compromis avec la production de l'hydroélectricité ou d'autres usages.



Les stratégies d'adaptation et les mesures d'atténuation pour les habitats ainsi que pour les ressources fauniques et floristiques impliquent aussi des efforts importants et difficiles à quantifier. L'une des approches pourrait être de modifier la régularisation des eaux afin de protéger la reproduction de certaines espèces. Sur le plan réglementaire, on devra possiblement revoir les règlements sur la pêche tels que la durée de la saison de pêche, les espèces permises et le nombre de prises avant que les pertes soient irréversibles. Aussi, on devrait envisager la création d'aires protégées ou de parcs.

Parmi les mesures d'atténuation possibles, il y a la maîtrise des espèces végétales et animales envahissantes, afin que des habitats végétaux de qualité puissent migrer plus près du lit mineur du Saint-Laurent. La création de nouveaux marais à des profondeurs moindres que ceux qui existent assurerait une reproduction minimale des poissons frayant tôt au printemps. Enfin, on pourrait également fixer des seuils adaptables pour maintenir un niveau d'eau minimal dans certains secteurs sensibles.

Apports d'eau potable

En ce qui concerne le problème d'approvisionnement des municipalités à même la rivière des Mille-Îles, plusieurs solutions sont envisagées y compris l'abaissement du seuil d'entrée de la rivière dans le lac des Deux Montagnes. Ailleurs, un déplacement de la prise d'eau suffirait à régler les problèmes causés par la baisse des débits. Enfin, les problèmes de baisse de la qualité de l'eau brute pourraient nécessiter la modification des paramètres de traitement de l'eau ou l'implantation de technologies différentes. La capacité de maintenir la qualité de l'eau en régularisant les débits demeure limitée, particulièrement pendant les périodes prolongées de faible hydraulité.

Transport maritime

Une baisse du niveau moyen du Saint-Laurent nécessiterait la mise en place de diverses mesures d'adaptation dans le corridor Montréal-Trois-Rivières impliquant tant des organismes fédéraux et provinciaux que les armateurs et autres organismes privés dont les activités sont liées de près au Saint-Laurent.

Afin de réduire l'incertitude liée à la profondeur du chenal de navigation, on pourrait investir plus d'efforts dans le suivi et la prévision des niveaux d'eau le long du Saint-Laurent. On pourrait aussi revoir le zéro des cartes (ZC) de référence utilisé pour la navigation et produire des cartes marines reflétant la configuration des nouveaux aménagements portuaires et du chenal de navigation. En outre, comme elle l'a fait auparavant, la Commission mixte internationale pour les Grands Lacs pourrait moduler les débits sortants du lac Ontario en fonction des besoins de la navigation commerciale en assurant sur une base ponctuelle les centimètres supplémentaires nécessaires.

Parmi les moyens d'adaptation liés aux plus faibles profondeurs, il y a aussi la réduction des tonnages, l'utilisation accrue de navires à plus faible tirant d'eau et la réduction de la vitesse de circulation maritime pour minimiser l'effet de squat. De plus, afin d'accroître les profondeurs disponibles du chenal de navigation et respecter les dégagements sous la quille prescrits, des travaux visant la réfection d'infrastructures, la reconfiguration d'aménagements portuaires et le surcreusement supplémentaire de certaines portions du chenal pourraient être envisagés.

Niveau des connaissances

Sur le plan hydrologique, le bassin versant du Saint-Laurent est couvert par plusieurs réseaux de suivi qui, ensemble, surveillent l'évolution des apports au Saint-Laurent sur une base horaire. Des modèles hydrologiques couplés aux modèles de circulation générale de l'atmosphère, et dans certains cas aux modèles régionaux, sont appliqués à certains bassins versants (comme ceux des Grands Lacs et des rivières Châteauguay et des Outaouais). Toutefois, l'ensemble du bassin versant du fleuve n'est pas couvert, de sorte que la prévision de la réaction des tributaires aux scénarios de changements climatiques ne peut être réalisée actuellement. Les séries temporelles de débits mesurés dans le passé demeurent encore l'outil de base dont les chercheurs disposent pour estimer les apports futurs ; leur usage est par contre limité puisque leurs caractéristiques statistiques seront modifiées par les changements du climat.

Des stations de suivi de la qualité des eaux sur les principaux tributaires du fleuve fournissent mensuellement des paramètres et un indice de la qualité de l'eau sur les plans bactériologique et physicochimique (Simard, 2002).

L'analyse des impacts des changements de niveau sur le système fluvial du Saint-Laurent, en fonction des apports d'eau, a débuté vers 1995 dans le cadre du Plan d'action sur le Saint-Laurent. La caractérisation de la physique du fleuve apparaît comme une étape essentielle des études d'impacts des changements de débit et de niveau. La modélisation de l'hydrodynamique, de la qualité de l'eau, de l'érosion et du transport sédimentaire dans différentes conditions de débit est présentement réalisée sur l'ensemble du fleuve. Elle servira de base à l'étude des impacts sur l'écosystème en général. Plusieurs tronçons du fleuve et plusieurs aspects essentiels (tel l'impact sur la distribution des masses d'eau) restent à traiter.

Les travaux réalisés dans le cadre du plan d'étude de la Commission mixte internationale visent à redéfinir les plans de gestion des eaux du système Grands Lacs – Saint-Laurent ; un modèle prédictif de la réaction de ce système sera mis en place. Cependant, celui-ci devra être amélioré et mis à jour à mesure que les connaissances évoluent.

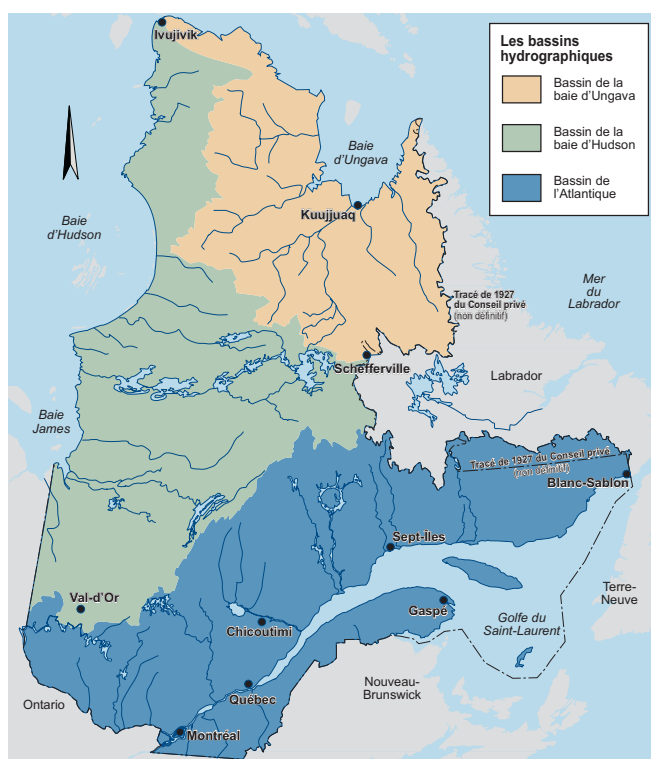
Ces travaux, en particulier ceux qui visent les impacts sur les espèces vivantes, sont embryonnaires et devront être complétés par l'analyse et la quantification des impacts sur la productivité primaire et des liens entre les niveaux trophiques. Il apparaît également essentiel de considérer les interactions avec les espèces menacées et les espèces introduites dans le milieu (plantes, moules, poissons, etc.) et de faire un suivi de l'évolution du système en validant les connaissances et les modèles mis en place.

LA GESTION DE L'EAU

La ressource hydrique au Québec (figure 22), représente en moyenne 990 km³ d'eau qui s'écoulent annuellement vers les océans et la baie d'Hudson dans plus de 4 500 rivières - 3 % des eaux renouvelables de la planète - et environ 2 000 km³ d'eau souterraine, dont 10 % se trouve en région habitée (MENV, 2002a, 1999). Un tiers du territoire québécois fait partie du bassin versant du fleuve Saint-Laurent. À lui seul, le fleuve contribue à près de 40 % du volume des eaux renouvelables et dessert 80 % de la population (Delisle, 1998).

Figure 22

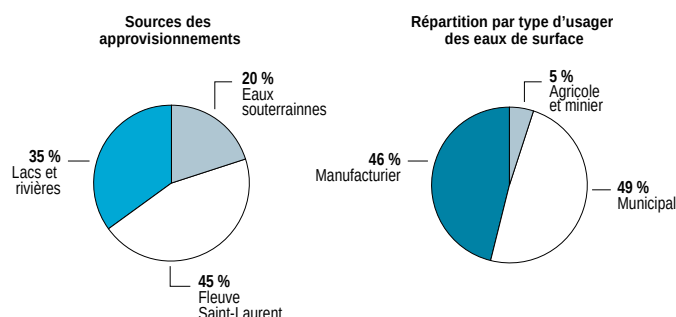
Les régions hydrographiques du Québec (Atlas Picard, 1994)



Comme le montre la figure 23, la provenance des approvisionnements annuels en eau de la population et de l'économie québécoise de près de 4,6 km³, se répartit entre le Saint-Laurent (environ 45 %), les lacs et rivières (35 %) et les eaux souterraines (20 %) (Gouvernement du Québec, 1997 ; MENV, 2002, 1999). Outre l'alimentation en eau potable, les différents usages de l'eau des aquifères, rivières et lacs constituent au Québec des instruments de développement économique et régional de premier plan. Ces usages peuvent être classés en deux catégories : les usages avec prélèvement (approvisionnement industriel, municipal, piscicole, agricole et minier, thermoélectricité) et les usages sur place (production hydroélectrique, transport fluvial, usages récréatifs, pêche, évacuation des eaux usées).

Figure 23

Approvisionnement en eau du Québec : sources et usagers (MENV, 2002, 1999 ; Gouvernement du Québec, 1997)



La qualité des eaux des parties en amont des principaux sous bassins versants du fleuve et des eaux souterraines est bonne (Gouvernement du Québec, 1997) mais on note certains problèmes liés à la qualité de l'eau en matière de gestion des eaux usées et potables en périphérie des grands centres urbains et industriels de même qu'en milieu agricole (Simard, 2002). Au fil des années, le Québec s'est doté de programmes d'assainissement afin d'assurer l'intégrité du milieu récepteur (Painchaud *et al.*, 2002) et d'un règlement sur la qualité de l'eau potable afin de protéger la santé publique. Cependant, comme en fait foi la publication récente de la Politique de l'eau, la société s'interroge à l'heure actuelle sur la façon de concilier les différents usages privés et publics de l'eau dans une perspective de développement durable et dans un contexte de modifications climatiques.

Impacts appréhendés

Les modes de gestion de l'eau dépendent avant tout de la demande et de l'offre pour satisfaire les différents usages ainsi que des lois et réglementations en vigueur. Les impacts des changements climatiques sur les systèmes d'approvisionnement et de traitement des eaux dépendent donc de leur nature et de leur ampleur, de la vulnérabilité des ressources hydriques et des infrastructures, de l'évolution de la demande et de la sensibilisation des institutions et entreprises à modifier leurs pratiques de gestion sous une nouvelle réalité climatique (Ressources naturelles Canada, 2002).

Eau potable

Au cours de la dernière décennie, des bris accidentels d'infrastructures, des fuites dans les réseaux, de trop fortes demandes ponctuelles ou de faibles pluviométries ont été à l'origine d'interdictions d'arrosage, de lavage de véhicules ou de remplissage de piscines; alors que des contaminations ponctuelles ou diffuses des sources d'eau potable ont été à l'origine en

plusieurs endroits d'avis d'ébullition ou d'interdiction de boire (Rousseau *et al.*, 2003). Récemment, à la suite de forts étiages estivaux, la ville de Québec et la ville de Rosemère ont atteint des seuils critiques d'approvisionnement en eau de surface. Les changements climatiques sont susceptibles d'intensifier ces problématiques.

En effet, les modifications appréhendées combinées de température et de précipitations sous des conditions à l'équilibre de $2\times\text{CO}_2$ occasionneront, selon toute vraisemblance, une diminution des écoulements des principaux tributaires du Saint-Laurent au cours des mois de juillet à octobre et une augmentation durant les mois de novembre à mars (Environnement Canada, 1999 a, b; Bruce *et al.*, 2000 ; MENV, 2000). La diminution des débits en été pourrait ainsi entraîner des difficultés plus fréquentes pour les municipalités qui s'alimentent en eau de surface à partir de ces tributaires. En ce qui concerne les eaux souterraines, il se pourrait également que le niveau de certaines nappes s'abaisse ou qu'elles s'épuisent.

Les débits mensuels moyens du Saint-Laurent à Montréal pourraient aussi diminuer de 24 à 40 % par rapport au niveau moyen de la période de 1900-1990 (Lofgren *et al.*, 2002; Mortsch *et al.*, 2000; Moulton et Cuthbert, 2000). Cependant comme les volumes d'eau du fleuve demeurent considérables, cette évolution ne devrait pas entraîner de problèmes pour les municipalités s'y approvisionnant sinon l'obligation de déplacer plus profondément certaines prises d'eau. La diminution potentielle du débit pourrait également déplacer le front salin (Bourgault, 2001) de 10 à 20 km de la pointe est de l'île d'Orléans vers l'amont ; mais, sauf dans une situation d'étiage critique où le front salin se déplacerait d'un 30 km supplémentaire, un tel déplacement ne devrait pas compromettre l'approvisionnement de Sainte-Foy et Lévis (Villeneuve *et al.*, 2001).

Eaux usées

Les baisses et les augmentations saisonnières du débit et du ruissellement causées par une modification du régime pluviométrique auront des conséquences directes sur le transport, le temps de séjour et la dilution des polluants, de même que sur la température de l'eau et, par conséquent, sur sa qualité. La modification appréhendée du régime hydraulique du Saint-Laurent pourrait perturber les panaches de mélange des affluents ou des rejets entraînant un élargissement ou un allongement de l'aire contaminée dans le cours d'eau récepteur. Une prise d'eau qui pouvait initialement se trouver hors d'un panache, pourrait s'y retrouver ce qui entraînerait une modification substantielle de la qualité de l'eau brute.

Au niveau du drainage urbain, les changements climatiques pourraient se traduire par une augmentation de la fréquence des événements de précipitations extrêmes causant, dans les cas d'une gestion déficiente des eaux pluviales, des refoulements, des inondations et des débordements sans traitement au milieu récepteur. En effet, les infrastructures existantes ont été dimensionnées sur la base des données historiques disponibles lors de leur construction et ne sont pas nécessairement en mesure de répondre à l'augmentation importante des fortes pluies attendue.

Conflits d'usage

Le groupe de travail sur les impacts, l'adaptation et la vulnérabilité aux changements climatiques du GIEC mentionnait dans son dernier rapport (GIEC, 2001 b) que les impacts sur le Saint-Laurent et ses tributaires pourraient produire des écarts considérables entre l'offre et la demande et occasionner des problèmes d'approvisionnement. Ainsi, la baisse des débits et la hausse des températures, notamment en saison estivale, pourraient créer ou accentuer des situations de conflits d'usage dans plusieurs régions du Québec particulièrement pour ceux qui s'approvisionnent en eaux de surface des lacs et rivières autres que le Saint-Laurent. En effet, l'augmentation des températures pourrait entraîner une augmentation des besoins en eau des populations urbaines et rurales à des fins domestiques et récréatives alors même que l'agriculture, favorisée par le réchauffement des températures, pourrait exiger davantage d'irrigation. De même, les besoins accrus en eau de procédés industriels, pour satisfaire une augmentation de la demande des marchés liée à la croissance démographique, pourraient entrer en compétition avec les usages sans prélèvement tels que la production hydroélectrique au fil de l'eau, les activités récréatives, le support aux écosystèmes aquatiques ou encore la dilution des déchets industriels et municipaux. Sur le Saint-Laurent, les conflits d'usages porteraient davantage sur le choix entre la navigation commerciale et l'approvisionnement en eau en été.

Inondations et débordements

L'un des changements climatiques appréhendés est l'augmentation de la fréquence des précipitations importantes. De tels événements pourraient entraîner des inondations et des débordements plus fréquents en zones inondables. Les coûts occasionnés par de tels événements seraient considérables. De même, les impacts sur les écosystèmes aquatiques (GIEC, 2001 b) et sur la qualité des eaux brutes et traités en raison d'une augmentation des crêtes de turbidité et des indicateurs microbiologiques de l'eau brute (Rose, J. B. *et al.*, 2000) seraient majeurs.

Stratégies d'adaptation

La réflexion sur les différentes stratégies d'adaptation aux changements climatiques débute au Québec, mais d'ores et déjà on peut avancer que, pour tous les usages de l'eau, il faudra accentuer la mise en place de mesures incitatives afin de faciliter la gestion de la demande et la conciliation des usages. Ces stratégies qui s'intégreront à l'ensemble de la politique de l'eau, devront s'attarder à cinq enjeux principaux :

- la sensibilité de la ressource eau,
- les besoins des principaux usagers,
- l'état et la capacité des infrastructures d'approvisionnement,
- la vulnérabilité de l'ensemble ressource-infrastructures,
- l'adaptation aux changements climatiques.

Eau potable

Face aux impacts appréhendés sur les approvisionnements en ressources en eau potable, la première stratégie d'adaptation consiste probablement à améliorer la gestion de la demande et ainsi réduire le niveau de la consommation totale. En effet, la consommation québécoise en eau potable est de 794 litres par jour par personne ce qui est supérieur à la moyenne canadienne qui est de 600 litres par jour par personne (Delisle (1998). Pour sa part, la consommation résidentielle se situe entre 350 et 400 litres par jour par personne au Québec ce qui représente environ le double de la consommation en France (150 litres par jour par personne) et en Angleterre (200 litres par jour par personne).

En ce qui a trait à l'adduction, si le régime hydraulique du Saint-Laurent atteint les niveaux appréhendés, plusieurs prises d'eau pourraient devoir être relocalisées. On peut également envisager que les instances de gestion des ouvrages hydrauliques du système Grands-Lacs – Saint-Laurent doivent revoir leurs règles d'opération. Pour les municipalités qui s'approvisionnent en eau souterraine, il faudra peut-être prévoir puiser plus en profondeur ou simplement assumer les coûts d'un approvisionnement en eaux de surface plus éloignées ou de qualité inférieure. Au niveau du traitement de l'eau potable, si les eaux brutes subissent une dégradation accrue, il faudra peut-être réviser l'efficacité de la chaîne de traitement.

Eaux usées

En ce qui a trait au drainage urbain, il faudra revoir les critères de conception des infrastructures. Mais comme on ne peut pas reconstruire toutes les infrastructures de réseau, il sera nécessaire de concevoir de nouvelles méthodes de gestion des eaux pluviales basées sur de nouvelles courbes d'intensité-durée-fréquence et prévoir la construction d'ouvrages de stockage importants pour éviter les inondations et les débordements. Dans un contexte de non stationnarité des données

météorologiques, il faudra réexaminer les débits de conception des objectifs environnementaux de rejets afin d'actualiser les normes des usines de traitement des eaux usées.

Conciliation des usages

La mise en place de structures de gestion par bassin versant (BAPE, 2000 ; Rousseau *et al.*, 2000) permettrait de faciliter la conciliation des usages de l'eau. À titre d'exemple, dans certains bassins versants du Sud du Québec comme celui de la rivière des Outaouais, la planification de la production hydroélectrique se fait en considérant et en intégrant les contraintes en aval des centrales tels l'approvisionnement en eau potable et les usages récréatifs de l'eau. Cette façon de faire rappelle que la gestion de l'eau demande que tous les usagers et la grande majorité des secteurs de l'activité économique modifient leur façon de faire dans le but de promouvoir le développement durable. En ce sens, il est à souligner que la nouvelle Politique nationale sur l'eau du Québec s'engage à mettre progressivement en place la gestion intégrée par bassin versant (MENV, 2002).

Contexte d'évaluation

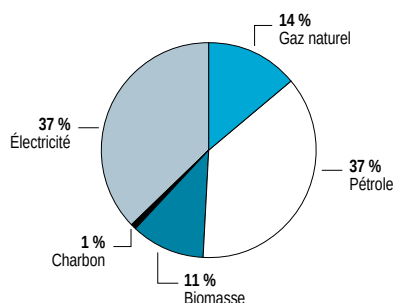
L'analyse des impacts et l'élaboration des stratégies d'adaptation aux changements climatiques demandent des données climatiques et hydrologiques détaillées à des échelles plus fines que celles présentement considérées par les modèles couplés de circulation générale (MCCG). À cet égard, on disposera pour le Québec, au cours des prochaines années, des résultats de simulations climatiques du modèle régional du climat canadien (MRCC, v3.6 ; Laprise *et al.*, 2003; Frigon *et al.*, 2002 ; Caya et Laprise, 1999). Ces résultats, produits dans le cadre du projet de modélisation climatique régionale d'OURANOS, pourront être utilisés pour piloter des travaux de modélisation hydrologique, hydraulique, limnologique et hydrogéologique. En attendant, il demeure possible de déterminer la sensibilité future des systèmes d'approvisionnement en utilisant des scénarios à partir de techniques de désagrégation des données dérivées des modèles de circulation générale du climat, actuellement en développement chez OURANOS. Ces techniques permettent de construire des scénarios de changements de précipitations, en incluant par exemple les extrêmes et la variabilité avec une quantification des incertitudes associées. On peut également faire appel à des scénarios « d'analogie spatiale », ce qui correspond à identifier des régions pour lesquelles le climat actuel possède un climat analogue à celui anticipé pour la région d'étude dans le futur. Le cumul de ces deux approches permet d'obtenir un meilleur éventail des scénarios plausibles et de leurs impacts potentiels. Enfin, il faudra disposer de scénarios de développement socio-économique crédibles à l'échelle des principales régions du sud du Québec.

Le Québec est une économie à forte consommation d'énergie en raison de sa structure industrielle, du climat, de l'étendue du territoire et, dans une certaine mesure, du style de vie nord-américain des Québécois. En 2000, le secteur industriel représentait, à lui seul, 40 % de la demande d'énergie, et celui des transports, près de 27 % tandis que la part des secteurs commercial, institutionnel et résidentiel constituait le reste, soit 33 %.

Pour plus de 37 % de ses besoins énergétiques, le Québec a l'avantage de pouvoir compter sur une électricité qui est essentiellement produite à partir de la ressource hydraulique, une source d'énergie renouvelable et non polluante. Cela explique en partie l'excellente performance du Québec aux niveaux canadien et nord-américain en matière d'émissions de gaz à effet de serre. En 2000, les émissions s'élevaient au Québec à 12,3 tonnes par habitant contre 23,5 tonnes au Canada et 24,8 tonnes aux États-Unis. Quant au gaz naturel et au pétrole, ils représentent respectivement 14 % et 37 % du bilan énergétique de 2000, la biomasse et les autres énergies non classiques s'accaparent le reste. Au total, la demande énergétique du Québec atteignait en 2000 près de 1 700 PJ (pétajoules) et devrait croître de près de 0,9 % par année d'ici 2021 – environ 15 PJ par année. Pour sa part, la demande d'électricité, près de 180 TWh (térawattheures) en 2000, devrait augmenter de plus de 46 TWh d'ici 2026.

Figure 24

Bilan énergétique du Québec
(Ministère des Ressources naturelles, 2001)



Le réchauffement des températures aurait deux effets directs et opposés sur la demande d'énergie en fonction des saisons : des besoins de chauffage moindres en hiver et des besoins de climatisation accrus en été. Le rapport entre la température, le chauffage et la climatisation dans le secteur résidentiel est bien connu et a fait l'objet de nombreuses analyses au cours des dernières décennies dans le cadre, notamment, d'études d'efficacité énergétique et d'analyses de prévision de la demande (Ministère des Ressources naturelles, 2001)¹³. Les connaissances sur les besoins de chauffage et, en particulier, de climatisation dans le secteur commercial et institutionnel sont toutefois plus limitées.

Les besoins de chauffage sont essentiellement proportionnels au nombre de degrés-jours¹⁴. Ainsi, une baisse de 10 % du nombre de degrés-jours entraîne une baisse de 10 % des besoins de chauffage. Toutefois, la demande d'énergie baisse non pas de 10 %, mais de 12 % en raison de la chaleur dégagée par les appareils électriques¹⁵ utilisés dans les résidences (chaleur gratuite). Les besoins de climatisation sont aussi fonction des degrés-jours, mais de façon moins directe, car les ménages et les entreprises ne recourent pas tous à la climatisation en période de chaleur et ne recherchent pas tous à maintenir le même degré de température ou niveau de confort. Aussi, le taux de pénétration des climatiseurs¹⁶ est-il appelé à augmenter en fonction de la richesse des ménages et de l'âge moyen de la population. De même, l'intensité énergétique de chaque appareil variera en fonction des caractéristiques de l'appareil et de ses températures de consigne.

Selon le modèle MÉDÉE (Ministère des Ressources naturelles, 2001), les hypothèses de réchauffement des températures estivales et hivernales au Québec sur 100 ans, telles qu'exposées au chapitre 1, entraîneraient une réduction de 15 % des besoins de chauffage résidentiel et une hausse de presque quatre fois des besoins de climatisation (voir figure 25). Comme la climatisation occupe beaucoup moins de place que le chauffage dans le bilan énergétique québécois, la hausse de 5,6 PJ pour la climatisation serait plus que compensée par la baisse de 31,9 PJ pour le chauffage, résultant ainsi en une diminution nette des besoins énergétiques de plus de 26,3 PJ.

¹³ Le ministère des Ressources naturelles du Québec publie périodiquement des analyses sur l'évolution de la demande d'énergie à moyen et long termes.

¹⁴ Degré-jour de chauffage : mesure de la différence entre la température moyenne d'un jour donné par rapport à une température de référence et qui exprime les besoins de chauffage domestique. La température de référence utilisée est 18 °C. Degré-jour de climatisation : identique au degré-jour de chauffage, sauf qu'il mesure les besoins de climatisation domestique au cours des mois chauds d'été. En général, les besoins de climatisation sont proportionnels à l'écart positif par rapport au seuil de 18 °C.

¹⁵ Cuisinière, sècheuse, lave-vaisselle et ampoule électrique.

¹⁶ Le pourcentage de ménages ayant un climatiseur central ou un modèle pour fenêtre.

Figure 25

Impact du réchauffement des températures sur la demande québécoise d'énergie des bâtiments résidentiels
(Ministère des Ressources naturelles, 2003)

Année	Degrés-jours de chauffage à Montréal ¹⁷	Écart par rapport à 2001 (%)	Demande de chauffage (PJ)	Écart par rapport à 2001 (%)	Degrés-jours de climatisation	Écart par rapport à 2001 (%)	Demande de climatisation (PJ)	Écart par rapport à 2001 (%)	Écart net (PJ)
2001	4 575		209,05		237		1,94		
2020	4 456	- 2,60	202,50	- 3,13	268	13,08	2,61	34,53	- 5,88
2050	4 280	- 6,45	192,86	- 7,74	317	33,76	3,97	105,15	- 14,15
2080	4 108	- 10,21	183,39	- 12,27	370	56,12	5,88	203,67	- 21,72
2100	3 994	- 12,70	177,16	- 15,25	409	72,57	7,51	288,04	- 26,31

En 2001, dans le secteur commercial et institutionnel, la demande pour le chauffage était de 121,1 PJ et, pour la climatisation, de 9,2 PJ. La part de la climatisation dans ce secteur est plus importante que dans le secteur résidentiel. En 2100, on prévoit une baisse en hiver de 12,70 % de degrés-jours par suite des changements climatiques, en réalité une baisse d'environ 13 % (ou 15,7 PJ) de la demande d'énergie, car la quantité de chaleur gratuite est moins importante dans ce secteur. Plutôt que de quadrupler comme dans le secteur résidentiel, les besoins liés à la climatisation dans le secteur commercial et institutionnel devraient doubler ce qui représenterait une hausse de 9,2 PJ. L'effet net de ces hypothèses représenterait une baisse de la demande d'énergie de 6,5 PJ.

Au total, selon le scénario moyen de la figure 8, on estime donc que l'impact du réchauffement des températures sur la demande d'énergie pour fins de chauffage et de climatisation dans l'ensemble des secteurs serait à terme une réduction de 32 PJ ou 9,4 % de la demande de 2001. Comme il s'agit essentiellement de chauffage, son effet sur la demande de pointe – plus coûteuse à satisfaire – des réseaux québécois d'électricité et de gaz naturel serait à terme plus important. Dans l'ensemble, il pourrait s'agir d'économies annuelles croissantes atteignant plusieurs centaines de millions de dollars.

À l'inverse, on peut prévoir que, dans les marchés voisins au sud du Québec, la diminution des besoins de chauffage sera plus que compensée par l'augmentation des besoins de climatisation en été. D'après une étude préparée pour la région métropolitaine de New York (Center for International Earth Science Information Network, 2000), la demande de chauffage diminuerait de 20 à 40 %, alors que la demande de climatisation augmenterait de 45 à 135 % selon les modèles et les

hypothèses à taux d'humidité constant. Un taux d'humidité plus élevé aurait pour effet d'augmenter l'élasticité entre la demande de climatisation et la température. Comme la climatisation est essentiellement électrique, la demande de pointe estivale (entre 7 et 17 %) augmenterait de façon progressive et substantielle au cours des prochaines décennies, accentuant ainsi la vulnérabilité des réseaux de production, de transport et de distribution d'électricité.

Stratégies d'adaptation

La réduction du chauffage ne nécessite en soi aucune adaptation particulière. Par contre, l'augmentation de la climatisation pourrait être atténuée par des actions simples, qui résulteraient en une diminution des apports de chaleur dans les résidences, telles la plantation d'arbres et l'utilisation de volets comme dans les pays chauds. L'utilisation de revêtements de surface à plus grande réflexion constitue aussi une bonne solution. Ces moyens simples pourraient concourir à réduire les besoins de climatisation tout en augmentant le degré de confort des résidences dépourvues de systèmes d'air climatisé. L'utilisation de systèmes de refroidissement à faible consommation d'énergie, comme les ventilateurs et les systèmes de climatisation par évaporation, permet de réduire l'usage des systèmes de climatisation à plus forte consommation d'énergie, soit en en retardant l'usage, soit en diminuant la demande de ces systèmes. Comme la durée de vie des habitations dépasse souvent 50 ans, il serait important de concevoir celles-ci en fonction de l'impact appréhendé des changements climatiques et si requis de l'installation éventuelle de systèmes de climatisation les plus efficaces possible.

17 Les degrés-jours de chauffage à Montréal sont donnés ici à titre indicatif. Cependant, les calculs de diminution et d'augmentation de la demande ont été faits pour chaque région individuellement.

La demande d'énergie est un domaine où le niveau des connaissances est relativement avancé en raison des importantes préoccupations relatives à la sécurité énergétique et où la modélisation est largement satisfaisante. Il pourrait cependant être utile de mieux connaître les impacts que pourraient avoir une fréquence accrue des événements climatiques extrêmes sur le comportement des réseaux et d'étudier les conséquences de divers scénarios climatiques alternatifs.

En ce qui concerne les réseaux voisins du sud, dans la mesure où les installations de transport d'électricité appropriées peuvent être mises en place, l'utilisation de la capacité de production des réseaux plus au nord représente une avenue intéressante pour satisfaire leurs besoins d'énergie croissants en été. L'hydroélectricité produit en effet beaucoup moins de gaz à effet de serre et profite de ce fait d'un avantage énorme

par rapport aux combustibles fossiles, fortement utilisés dans les réseaux voisins du Québec. Tout en réduisant globalement les émissions de GES, la possibilité existe donc dans ce nouveau contexte de développer de nouveaux marchés externes pour l'hydroélectricité.

La discussion sur la satisfaction des besoins énergétiques du Québec par les différentes formes d'énergie déborde le cadre de ce document. Toutefois, une stratégie d'adaptation visant à optimiser globalement à la fois la réduction des GES et le développement d'opportunités économiques sur les marchés internes et externes aurait des conséquences sur l'utilisation relative des diverses formes d'énergie. Par exemple, on pourrait envisager un scénario d'augmentation de l'usage du gaz naturel dans le chauffage pour exporter davantage d'électricité et ainsi réduire les émissions de GES liées à la production d'électricité à partir du charbon ailleurs en Amérique du Nord.



LE TRANSPORT

Le secteur du transport joue un rôle majeur dans l'activité économique du Québec tout autant que dans la vie des individus. En effet, le transport est un facteur important de compétitivité dans l'accès du Québec aux marchés étrangers. Sur le plan intérieur, le transport est essentiel à la plupart des activités commerciales, de travail ou de loisir. Dans ce secteur, le climat exerce une influence non négligeable tant pour ses valeurs moyennes qu'extrêmes, qu'il s'agisse de transport terrestre, maritime ou aérien. À cet égard, il suffit de penser aux importantes perturbations causées par les tempêtes de neige tant dans les transports aérien que terrestre. Cette influence varie selon les régions et la nature des infrastructures de transport. Notre connaissance des impacts concrets et quantifiables des changements climatiques sur les activités et les infrastructures de transport au Québec est cependant peu développée. À ce jour, seules quelques études traitent des impacts potentiels. Les inquiétudes relatives aux impacts des changements climatiques portent d'abord sur les infrastructures, puis sur les conditions de transports.

Impacts appréhendés

Les changements climatiques se manifesteraient par une modification du régime des précipitations et une hausse des températures, accompagnée en hiver d'une fréquence accrue de gel et de dégel ainsi que de pluies verglaçantes, et causeraient un rehaussement du niveau des mers. Les observations faites jusqu'à maintenant font penser que les impacts varieraient considérablement selon le mode de transport (routier, maritime, ferroviaire et aérien) et les régions.

En outre, les événements climatiques peuvent, séparément ou conjointement, influencer sur la fréquence de phénomènes naturels – comme les coulées de boue, les avalanches, les éboulements, les inondations, les fortes marées et les tempêtes d'amplitude variée qui pourraient à leur tour influencer grandement sur l'efficacité et la durabilité des infrastructures de transport dans l'ensemble des régions du Québec (Environnement Canada, 1997c).

Il est donc prévisible qu'au Québec, l'intégrité de corridors de transport dans les zones déjà sensibles aux intempéries ou présentant un risque potentiel non négligeable serait affectée négativement par les changements climatiques. En particulier, les infrastructures de transport routier, en région métropolitaine et urbaine, sont vulnérables, et pourraient subir des pertes matérielles potentielles. Les inondations au Saguenay (1996) et la grande tempête de verglas dans sud-ouest du Québec (1998) illustrent très bien les dommages pouvant être causés aux infrastructures de transport lors de ce genre de circonstances. De même, au cours de la tempête de verglas, les ponts et les autres structures ont été particulièrement difficiles à déglacer, ce qui a menacé la sécurité des usagers de la route. Par ailleurs, plusieurs routes et une autoroute ont dû être fermées.

La section intitulée « L'érosion côtière » aborde la question des dommages que pourrait subir notre réseau routier dans les régions côtières, en raison de plusieurs facteurs conjugués, dont le rehaussement du niveau de la mer ainsi que l'amplification des vagues et des tempêtes associées à l'activité cyclonique. Selon le scénario moyen de prévision du GIEC,

le rehaussement du niveau de la mer atteindrait plus de 30 cm au cours du siècle. En outre, les derniers résultats du modèle de circulation atmosphérique générale du Canada indiquent que, d'ici 2045, le golfe du Saint-Laurent se retrouverait sans glace l'hiver. Cela ferait augmenter la fréquence des vagues extrêmes. Tous ces phénomènes feraient aussi augmenter l'érosion des berges et l'importance des dommages aux infrastructures routières situées le long ou à proximité des côtes (Forbes, D.L. *et al.*, 2002). Les infrastructures portuaires pourraient aussi être affectées.

On constate, par exemple, que la route nationale qui ceinture la péninsule gaspésienne (route 132) est à plusieurs endroits de plus en plus menacée par le recul des côtes. Les coûts des interventions de protection sont importants. La fréquence et la récurrence des interventions de protection sont aussi de plus en plus élevées. Les plus grands dommages que subissent les ouvrages de protection le long de la route nationale surviennent lors de violentes tempêtes, aussi soudaines qu'imprévisibles. On entrevoit donc que les changements climatiques pourraient amplifier ce phénomène auquel contribuent d'autres facteurs importants, liés à des activités qui se déroulent loin des côtes, tels que l'aménagement de rivières, le déboisement, le drainage agricole et l'agriculture (Morneau, F. *et al.*, 2001).

Dans le Nord québécois, plusieurs routes « toutes saisons » deviendraient vulnérables, car elles sont construites dans des zones de pergélisol (Environnement Canada, 1997c). Dans certains villages du Nunavik, certaines infrastructures aéroportuaires présentent déjà des déformations accélérées causées par la fonte du pergélisol (voir la section *L'Arctique québécois*).

L'entretien des voies de transport ou la viabilité hivernale

En ce qui a trait aux coûts directs liés à l'entretien des voies de transport en hiver, un certain nombre d'études présentent une évaluation généralement positive des impacts des changements appréhendés. En effet, selon les prévisions des modèles climatiques, les hivers seraient moins longs et rigoureux, ce qui contribuerait à réduire les frais d'entretien des routes. Le budget annuel de déneigement a ce titre, pour le réseau sous la responsabilité du ministère des Transports du Québec représente environ 180 millions de dollars. La hausse des températures pourrait avoir pour conséquence une réduction considérable de ces coûts. Mais là encore, les données scientifiques appuyant cette affirmation sont peu nombreuses et souvent non spécifiques aux régions du Québec.

Toutefois, les coûts d'entretien hivernal liés aux précipitations verglaçantes plus fréquentes pourraient augmenter car elles

sont plus coûteuses et plus difficiles à traiter. L'apparition de ce nouveau régime de précipitations aurait pour effet d'accroître le niveau de tension des équipes d'entretien. De plus grandes quantités de sels seraient utilisées sur les routes, ce qui causerait des impacts négatifs indirects tels que la corrosion des structures. De plus, le revêtement des routes pourrait subir davantage de dommages en raison des périodes gel/dégel plus fréquentes, les températures se situant davantage plus près du point de congélation.

Sur ces questions, les données scientifiques sont en général peu nombreuses et non spécifiques aux régions du Québec. En outre, les observations disponibles amènent à penser que les impacts varieraient considérablement selon les différentes régions du Québec.

Navigation

Un des grands problèmes causés par les changements climatiques dans le domaine des transports est lié à la baisse anticipée des niveaux d'eau du Saint-Laurent (voir la section *Le Saint-Laurent*). En l'absence de stratégies d'adaptation appropriées, cette baisse des niveaux d'eau pourrait avoir des impacts économiques importants. Par exemple, pour des raisons de dégagement sous quille à certains endroits, une baisse des niveaux d'eau exigerait qu'on réduise à court terme le tonnage et qu'on augmente le nombre de navires pour acheminer des quantités de fret équivalentes. Réduire les tonnages, comme cela s'est produit sporadiquement au cours des dernières années, signifierait donc réduire la compétitivité du trafic maritime. En revanche, l'allongement possible de la saison de navigation en eaux libres pourrait entraîner une réduction des dommages causés aux bateaux par les glaces ainsi qu'une utilisation moindre des brise-glaces par la Garde côtière.

Impacts sur l'utilisation des modes de transport

Le rapport du GIEC mentionne qu'un accroissement des précipitations estivales, pourrait entraîner une augmentation des accidents de la route et des blessures des personnes. Même si elles étaient en moyenne moins abondantes, les précipitations dans un environnement plus sec entraîneraient plus d'accidents que dans un climat généralement plus humide. Des conditions de fortes chaleurs pourraient aussi causer des problèmes de détérioration de l'asphalte et du béton ainsi que de torsion des rails de chemin de fer. Les véhicules sont également plus sujets à des problèmes de surchauffe. À l'inverse (Adams, 1997), les bris mécaniques et les coûts reliés au fonctionnement des véhicules seraient nettement moindres par temps froid.

Stratégies d'adaptation

Le secteur des transports devra rapidement tenir compte des données concernant les changements climatiques. Pour cela, on devra réaliser une collecte d'informations reliées aux impacts appréhendés afin de mieux définir les activités d'orientation et de planification, de même que les stratégies d'amélioration de la sécurité. Aussi, ce secteur devra vite s'adapter à l'évolution des niveaux et des types de précipitations ainsi qu'aux changements des niveaux d'eau des rivières et des lacs au Québec.

En ce qui concerne l'érosion littorale, des actions coordonnées liées à l'aménagement du territoire et aux infrastructures de transport devront être élaborées. En fonction des particularités de chaque région et de l'évolution des problématiques, différentes stratégies de consolidation, de retrait ou de planification pourront être appliquées (voir la section *L'érosion côtière*). Elles devront également viser à limiter les répercussions environnementales dans le cadre d'une planification intégrée. Un plan d'intervention soucieux de la sauvegarde de l'équilibre des dynamiques littorales devra aussi considérer les préoccupations du milieu.

Pour ce qui concerne les impacts importants d'une baisse du niveau moyen du Saint-Laurent, plusieurs mesures d'adaptation peuvent être envisagées en aval dans le corridor Montréal-Trois-Rivières. Ces mesures interpellent à la fois les organisations publiques fédérales et provinciales, de même que les armateurs et autres organisations privées, dont les activités sont liées de près au Saint-Laurent (voir la section *Le Saint-Laurent*).

Afin d'informer adéquatement la communauté maritime sur les profondeurs prévisibles du chenal de navigation, on pourrait augmenter les efforts de suivi et de prévision des niveaux le long du Saint-Laurent. La Commission mixte internationale pour les Grands Lacs pourrait aussi intervenir en modulant les débits sortants du lac Ontario en fonction des besoins de la navigation commerciale, en fournissant sur une base ponctuelle les quelques centimètres requis. On pourrait aussi revoir à la baisse le zéro des cartes de référence utilisé pour la navigation et mettre à jour les cartes marines pour y intégrer la configuration des nouveaux aménagements portuaires et du chenal de navigation.

Parmi les moyens d'adaptation liés aux plus faibles profondeurs, il y a la réduction des tonnages, l'utilisation accrue de navires à plus faible tirant d'eau et la réduction de la vitesse de circulation maritime pour minimiser l'effet de squat. De plus, afin d'accroître les profondeurs disponibles du chenal de navigation et respecter les dégagements sous la quille prescrits, des travaux visant la réfection d'infrastructures, la reconfiguration d'aménagements portuaires et le surcreusement supplémentaire de certaines portions du chenal pourraient être envisagés. Il devient essentiel de mettre en pratique des principes de gestion garantissant le développement durable d'un réseau portuaire stratégique compétitif,

s'articulant autour d'infrastructures de qualité qui favorisent les activités de cabotage et l'intermodalité.

Les connaissances sur les impacts réels et quantitatifs liés aux changements climatiques sont assez peu nombreuses. Pour mieux cerner les impacts des changements climatiques, on devra disposer de données climatiques spécifiques aux régions du Québec, notamment pour la viabilité hivernale et l'entretien des routes, de même que pour la sécurité des transports.

Pour le secteur des transports, cinq orientations de recherche sont à privilégier :

- déterminer les vulnérabilités des activités de transport en identifiant les impacts connus et appréhendés des changements climatiques par l'acquisition et l'inventaire de données et paramètres pertinents ;
- considérer l'érosion côtière accrue par la hausse du niveau de la mer et l'augmentation en nombre et en intensité des événements météorologiques extrêmes en égard aux infrastructures du transport afin de déterminer les mesures requises ;
- identifier les nouvelles conditions géomorphologiques induites par la fonte du pergélisol afin de déterminer les impacts sur les infrastructures routières, maritimes et aéroportuaires du Nord du Québec ;
- évaluer les conditions nécessaires à la pérennité du transport maritime sur le fleuve Saint-Laurent et de ses infrastructures par le biais d'une meilleure connaissance de la fluctuation appréhendée des niveaux d'eau ;
- déterminer les ajustements nécessaires aux pratiques liées à la viabilité hivernale en fonction des nouvelles conditions dues à la variation du régime de précipitations et des cycles gel/dégel.



L'un des aspects les plus préoccupants des changements climatiques pour la population en général est certainement celui de leurs impacts sur la santé et la mortalité. C'est peut-être aussi l'un des domaines où une meilleure anticipation des changements à venir peut le plus contribuer à la mise en place de mesures d'adaptation permettant de réduire grandement les impacts appréhendés (World Health Organization, 2000, 2001, 2003).

Impacts appréhendés

En matière de santé humaine, les impacts des changements climatiques seraient différents d'une région à l'autre du Québec. L'augmentation des températures et des événements extrêmes ainsi que les impacts indirects causés par la présence accrue d'agents pathogènes sont autant de phénomènes qui auront une incidence sur la santé des Québécois.

Le réchauffement du climat donnerait lieu à des impacts directs tant positifs que négatifs. Ainsi, des hivers plus doux pourraient avoir un impact positif : la réduction de la morbidité et de la mortalité causées par le froid. Cela aurait pour effet de réduire les maladies et les décès d'origine cardiovasculaire. À l'opposé, des étés plus chauds comportant de plus longues périodes de canicules, particulièrement dans le sud, entraîneraient une augmentation du taux de mortalité et de maladies respiratoires et cardiovasculaires, même si une acclimatation progressive réduirait de beaucoup cet impact initial. À titre d'exemple, la vague de chaleur de Chicago, en 1995, a fait augmenter les décès de 85 % par rapport à l'année précédente. Il faut aussi noter l'augmentation considérable des décès en Europe lors de la canicule survenue à l'été 2003.

Sur tout le territoire, il pourrait y avoir un accroissement des maladies infectieuses, du stress, du niveau de tensions sociales et psychologiques, ainsi que des risques pour la santé au travail. Les personnes âgées et les enfants seraient les plus vulnérables (Institut national de la santé publique du Québec (INSPQ), 2003), ainsi que les personnes ayant des problèmes respiratoires et cardiovasculaires, les travailleurs (ceux qui travaillent à l'intérieur comme à l'extérieur) et les populations urbaines défavorisées, comme les citoyens à faible revenu et les sans-abri. En particulier, les gens ne disposant pas de climatisation sont plus menacés ; à Montréal, le taux de climatisation des résidences n'est que de 20 % contre 60 % à Toronto.

Plus particulièrement dans le sud, les réchauffements occasionneraient une augmentation de la pollution de l'air (contaminants, pollens et spores) et probablement de

la fréquence et de l'intensité des événements de smog¹⁸. La recrudescence des maladies respiratoires (asthme et fièvre des foins) et cardiovasculaires constituerait l'impact négatif sur la santé le plus probable. Plusieurs études menées à Montréal montrent des augmentations significatives des décès par maladies respiratoires (de l'ordre de 7%), en fonction des niveaux d'ozone et de particules fines, lors de certains épisodes étudiés (Goldberg, 2001). Les visites à l'urgence pour problèmes respiratoires peuvent aussi augmenter de façon importante (de l'ordre de 20%), particulièrement chez les personnes âgées (Delfino, 1997). Il pourrait également y avoir une incidence accrue de cancers de la peau reliés à l'exposition aux ultraviolets et de décès prématurés. Bien que l'on suppose que tous les Québécois seront touchés, les personnes ayant des problèmes respiratoires et cardiovasculaires ainsi que des problèmes neurologiques seront les plus vulnérables.

Dans toutes les régions du Québec, on prévoit une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes (par exemple, inondations et orages violents), les zones situées au sud du 55^e parallèle étant particulièrement vulnérables. Ces événements causeraient des décès et des blessures en nombre plus élevé comme au temps de la crise du verglas, notamment sur les routes. De même, ils entraîneraient un stress accru pour une certaine partie de la population – des études montrent qu'à la suite d'un événement climatique exceptionnel (comme une inondation ou un ouragan), de 20 à 30 % des adultes touchés portent les signes diagnostiques du syndrome de stress post-traumatique lorsque celui-ci est mesuré deux ans après l'événement (Maltais, 2001). Les événements extrêmes seraient à l'origine de tensions psychologiques et sociales plus aiguës, affectant aussi le milieu de travail. Même si on peut affirmer que toute la population sera potentiellement touchée, les impacts seront plus importants dans les zones à risque où ces événements climatiques sont plus susceptibles de se produire comme les plaines inondables, les zones côtières ou les régions propices au verglas.

Les changements dans la distribution géographique des moustiques, des tiques et des autres vecteurs potentiels de maladies transmissibles se feront surtout sentir dans le sud du Québec. Cela pourrait avoir pour effet le plus probable l'apparition de nouvelles sources de morbidité causée par les bactéries, les virus et autres agents pathogènes transmis par les porteurs. Tous les individus seraient concernés, plus particulièrement les travailleurs agricoles ou forestiers, les personnes souffrant de maladies chroniques ou présentant des déficiences immunitaires, de même que les personnes âgées.

18 La chaleur favorise le smog photochimique estival provenant de la réaction entre les oxydes d'azote et les composés organochimiques volatils.

La chaleur et la baisse des niveaux d'eau favoriseraient le développement d'agents infectieux associés à l'eau de consommation, à la baignade et à la nourriture qui viendraient modifier l'écologie locale de toutes les régions du Québec. Survivraient ainsi des changements notables dans l'incidence des maladies à entérobactéries et parasites – les intoxications alimentaires, les diarrhées et autres maladies infectieuses existantes – et l'on assisterait à l'émergence de nouvelles maladies infectieuses. Dans un tel scénario, si personne n'est à l'abri de ces maladies, ce sont les populations rurales qui sont souvent les plus à risque, en raison du faible niveau du traitement de l'eau de consommation en dehors des zones urbaines et d'une plus grande proximité des animaux.

Stratégies d'adaptation

Dans les pays développés, on a tendance à minimiser le niveau de risque et la nécessité d'agir immédiatement sous prétexte que les problèmes climatiques ne concernent que les pays en développement. Or, tous les individus du globe seront touchés par les problèmes associés aux changements climatiques ; seuls différeront, d'un endroit à un autre, leur amplitude et les moyens d'y faire face. Les mesures privilégiées pour réduire les impacts sanitaires associés aux changements climatiques relèvent des stratégies habituelles de la santé publique – telles une surveillance accrue, la sensibilisation du grand public et des questionnaires, l'adaptation des infrastructures au nouveau contexte et la formation des intervenants.

Ainsi, la mise en place de systèmes de surveillance en temps réel pour certaines maladies infectieuses émergentes pouvant être reliées aux changements climatiques (par exemple, le virus du Nil occidental) est un bel exemple du premier type de mesure. Une plus grande surveillance épidémiologique s'impose également en matière de qualité de l'eau parce que la chaleur favorise un développement plus rapide des agents pathogènes. Cette mesure viendrait compléter la mise à jour de la réglementation de l'eau potable et du contrôle des eaux usées. Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), le monitoring et la surveillance représentent la forme la plus élémentaire d'adaptation. La détermination et le développement d'indicateurs semblent des avenues souhaitables pour suivre l'évolution des impacts climatiques sur l'environnement et la santé humaine sur un territoire particulier. Ce n'est qu'à cette condition qu'un programme de suivi peut être mis en place.

La sensibilisation du public joue aussi un rôle majeur. En effet, la climatisation et une bonne hydratation constituent les solutions les plus appropriées à une hausse des températures accompagnée de périodes de canicule prolongées. À cet égard, rappelons que le taux de climatisation est beaucoup inférieur à Montréal qu'à Toronto. Comme l'acclimatation est très importante, le changement des habitudes de vie durant

ces périodes peut aussi influencer sur les conséquences des vagues de chaleur. La mise en place d'un système de veille/avertissement de chaleur accablante constitue aussi un moyen complémentaire à privilégier. À ces mesures pourraient s'ajouter des interventions ponctuelles, notamment liées à l'usage des véhicules, pour contrer les épisodes de smog, comme on le fait en Ontario.

D'autres mesures pour améliorer les infrastructures devront également être prises par les autorités publiques, allant par exemple de la climatisation des hôpitaux de soins prolongés à l'amélioration des systèmes municipaux et individuels de traitement et de filtration des eaux.

La formation du personnel des réseaux de santé et de protection civile revêt aussi une grande importance. Il faudrait notamment assurer la formation continue des cliniciens sur les maladies émergentes et le suivi des urgences, ainsi qu'une meilleure préparation des équipes de santé publique pour la gestion des événements climatiques exceptionnels et leur suivi, entre autres les équipes qui assurent le suivi épidémiologique.

Les stratégies d'adaptation doivent être proactives plutôt que réactives : des catastrophes naturelles comme le déluge du Saguenay de 1996 et la tempête de verglas de 1998 sont une preuve irréfutable qu'une bonne préparation minimise grandement les impacts négatifs. Des plans d'urgence municipaux à jour de même que l'identification des populations vulnérables sont essentiels et doivent faire partie des stratégies d'adaptation.

État des connaissances

Tous les auteurs des principales études en la matière s'entendent sur un point : l'information disponible sur la sensibilité de la santé humaine aux caprices de la météo et aux changements climatiques pressentis est très limitée. Cette lacune concerne l'information tant scientifique que traditionnelle ou populaire, essentielle dans certaines régions pour compléter le portrait d'ensemble.

Il faut améliorer la qualité des données sur l'environnement et sur la santé. Pour pallier les carences de la connaissance scientifique en matière d'environnement et de santé de certains territoires, en particulier là où la population est clairsemée, des spécialistes ayant reçu la formation appropriée, auront à faire des observations et des consultations locales.¹⁹

La réalisation d'études spécifiques des différents impacts sur le territoire du Québec est souhaitable, semblables aux études en cours portant sur l'eau de consommation au Nunavik et sur les contaminants, les pollens et les spores dans le sud du Québec. Dans toute démarche entreprise en ce sens, il est nécessaire

¹⁹ Une équipe formée de l'Unité de recherche en santé publique du Centre hospitalier universitaire de Québec (CHUQ) et de l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) travaille actuellement à l'élaboration d'un tel système de collecte de données pour le Nunavik et le Labrador (Northern Ecosystem Initiative, 2003).

de considérer l'ensemble des impacts sur les composantes humaines des écosystèmes telles que la santé humaine, les modes de vie, les infrastructures et les aspects socioéconomiques. À cet égard, une approche multidisciplinaire est également recherchée, car elle réunit des spécialistes de différents domaines : sciences environnementales, biomédicales, sociales et comportementales, notamment en ce qui concerne les impacts de nature psychologique et sociale induits par les changements climatiques.

Plusieurs auteurs (Last et al., 2001 ; Smith et al., 2001) suggèrent d'établir un niveau de risque propre aux différents groupes de population (aînés, enfants, autochtones, sans-abri), en tenant compte du lieu où les gens vivent. Pour établir le niveau de risque approprié, plusieurs éléments doivent être précisés : densité de population, niveau de développement social, économique et technologique des populations étudiées, état de santé général, environnement local, qualité et

disponibilité des soins de santé, réseau de santé et état de préparation aux situations d'urgence.

Beaucoup d'études ne citent que les impacts négatifs des changements climatiques, négligeant du coup leurs impacts positifs. Si, dans une région donnée, il peut conduire à l'apparition de vecteurs nuisibles à la santé, le réchauffement climatique peut également prolonger la durée de certaines saisons de culture, contribuant ainsi à rehausser le niveau économique ou la sécurité alimentaire de cette même région. Enfin, la plupart des études n'ont pas traité d'impacts de nature psychologique et sociale²⁰.

Au niveau international, le partage des connaissances et des résultats de recherche est particulièrement important. Sur ce point, le secteur de la santé est déjà bien organisé sur le plan canadien (C-CIARN Santé) comme sur le plan international (Centre Collaborateur OMS du CHUQ).

LE TOURISME

Le tourisme est l'une des activités économiques parmi les plus importantes risquant d'être affectée directement par les changements climatiques, de façon soit négative, soit positive. Le tourisme dépasse en production de nombreuses autres industries et offre de nombreux emplois. Or, le climat est dans bien des cas l'une des principales ressources naturelles sur laquelle est fondée l'activité touristique, directement (soleil, beau temps, neige et glace) ou indirectement (paysages et végétaux), particulièrement en ce qui concerne les activités récréatives extérieures. Il détermine la durée et la nature des activités, qu'il s'agisse de neige et de froid pour le ski et la motoneige, d'eau pour la baignade et les activités nautiques, de coloration des feuilles à l'automne pour la marche en forêt. Enfin, le climat influence aussi les conditions de vie du gibier et du poisson pour la chasse et la pêche.

Impacts appréhendés

Selon une étude, une hausse de température de 1 °C en été augmenterait les recettes touristiques de 4 % au Canada, alors qu'à l'inverse une baisse de 1 °C n'aurait qu'un impact marginal en hiver (Wilton et Wirjanto, 1998).

Toutefois, les évaluations générales risquent d'être trompeuses, car une foule de facteurs entre en ligne de compte. Ainsi, le poids de chacune des activités récréotouristiques par rapport à l'ensemble affecte la sensibilité globale saisonnière, alors que la sensibilité de chacune de ces activités par rapport aux

températures est très différente selon les saisons. Si certaines activités, tel le tourisme culturel, sont peu ou moins sensibles aux aléas climatiques, d'autres comme les activités de plein air et de sport le sont beaucoup plus. Ainsi, pour chaque activité récréative extérieure propre à chaque saison, on fait face à des seuils très différents qu'il importe d'analyser séparément. Enfin, même si les changements climatiques étaient favorables à la récréation et au tourisme, d'autres phénomènes reliés, comme l'érosion côtière ou les déficits hydriques des lacs et des rivières (Wall, 1998b), pourraient aussi affecter négativement l'industrie.

Dans l'industrie du ski, on pourrait s'attendre à première vue à des pertes importantes. Ainsi, on prévoit qu'avec le réchauffement causé par des concentrations de GES deux fois plus élevé, il pourrait y avoir un raccourcissement notable de la saison, particulièrement au printemps (Wall, 1998a). Des études portant sur les Basses-Laurentides estiment les pertes potentielles de 34 à 49 % de la saison de ski (McBoyle et Wall, 1992) et de 42 à 87 % (Lamothe et Périard, 1987). Une étude postérieure de l'industrie ontarienne du ski présente un pronostic moins sévère avec une réduction estimée de 21 à 34 %, en fonction du modèle climatique utilisé (Scott et al., 2002). Les investissements en fabrication de neige ont grandement réduit la vulnérabilité des stations de ski aux aléas climatiques. Il est même possible que certains centres de ski profitent des difficultés créées par les changements climatiques aux centres de ski des régions plus au sud ou à ceux qui sont moins élevés en altitude. Par contre, d'autres activités,

²⁰ Mentionnons qu'un premier atelier sur les changements de comportement reliés aux changements climatiques a été organisé à Québec en août 2002 (Gosselin, 2002).

tels la motoneige et le ski de randonnée, qui ne bénéficient pas des mêmes moyens, pourraient être plus durement affectées par des réductions de saison allant jusqu'à 50 % dans certaines régions. De même, la pêche sur la glace présente une grande vulnérabilité aux hausses de températures, pouvant entraîner en outre des risques accrus pour la sécurité des pêcheurs.

Du côté des activités estivales, des impacts négatifs pourraient venir notamment, de l'accroissement des précipitations ou encore du nombre de journées de canicule. De même, l'entretien des terrains de golf pourrait s'avérer plus coûteux si l'augmentation de l'évapotranspiration due au réchauffement de température devait résulter en un assèchement des terrains surtout dans les mois d'été. Les activités de baignade pourraient aussi être affectées par une dégradation de la qualité de l'eau. Aussi, la pêche de plusieurs espèces pourrait être sérieusement perturbée dans la mesure où celles-ci sont sensibles à de faibles variations de température notamment pour les conditions de reproduction.

Stratégies d'adaptation

Les stations de ski ont déjà des moyens d'adaptation qui les aident à faire face à des changements climatiques modérés, comme ceux qui sont appréhendés au cours des prochaines décennies. Ici encore, en fonction des seuils de tolérance de chaque activité à divers paramètres climatiques, les stratégies d'adaptation peuvent varier grandement. Par exemple pour le ski de descente, l'usage des canons à neige s'avère efficace dans la mesure où les températures se maintiennent à des niveaux adéquats. Par contre, il n'y a pas de solution immédiate pour la motoneige et le ski de randonnée. Les solutions se trouvent probablement davantage dans le développement d'une plus grande diversité d'activités de loisir, adaptée à l'évolution du climat, pour répondre à la fois aux besoins des consommateurs et aux nécessités du développement économique durable.

Une autre approche consiste à développer des vocations différentes par site en fonction de leurs caractéristiques climatiques. On pourrait par exemple favoriser le développement du ski de randonnée et de la motoneige dans les régions moins sensibles aux réchauffements climatiques, tout en favorisant l'adaptation technologique pour le ski de descente.

Du côté des activités récréatives d'été, plusieurs moyens peuvent être envisagés pour atténuer les effets négatifs d'un réchauffement. Ces moyens vont de l'aménagement d'un couvert végétal sur les berges des cours d'eau pour la pêche sportive à une surveillance accrue de la qualité de l'eau aux endroits réservés à la baignade. Les stratégies d'adaptation devraient aussi comprendre l'aménagement d'équipements capables de satisfaire à une hausse de la demande, que pourrait entraîner une augmentation des températures, ou encore l'allongement des périodes d'ouverture.

Des études plus poussées précisant les impacts appréhendés et les stratégies d'adaptation potentielle seraient nécessaires. En effet, il y a relativement peu d'études disponibles sur les impacts des changements climatiques dans le domaine du tourisme, la recherche et la documentation traitant davantage du développement durable des activités touristiques, de l'évolution du marché pour les activités touristiques et récréotouristiques, du marketing territorial et la construction d'espaces touristiques. Pour ce qui est des impacts, bien qu'il existe quelques recherches de grande envergure sur les impacts économiques par région, elles ne sont pas nombreuses en raison probablement de leur coût et ne traitent en général pas du phénomène des changements climatiques. Dans le cas des centres de ski en particulier, il faudrait disposer de scénarios climatiques à résolution spatiale plus fine, les impacts pouvant varier considérablement selon la région et l'élévation des centres de ski.

Si des progrès importants ont été accomplis quant à la compréhension des difficultés d'adaptation des activités agricoles et même forestières aux changements climatiques, il n'en est pas de même pour les activités touristiques et récréotouristiques. L'adaptation demande une connaissance profonde des acteurs – les promoteurs et les gestionnaires des activités et des infrastructures touristiques et récréotouristiques – afin de connaître l'importance relative accordée aux changements climatiques selon les scénarios, les seuils de tolérance des activités et les diverses possibilités d'adaptation spontanée ou planifiée. Du côté des consommateurs ou des utilisateurs d'infrastructures touristiques, il y aurait lieu de préciser leurs réactions à différents seuils climatiques pour chacune des activités et à l'attrait que celles-ci exercent l'une par rapport à l'autre dans les nouvelles conditions climatiques.



LES ÉVÉNEMENTS CLIMATIQUES EXTRÊMES ET LA VARIABILITÉ NATURELLE

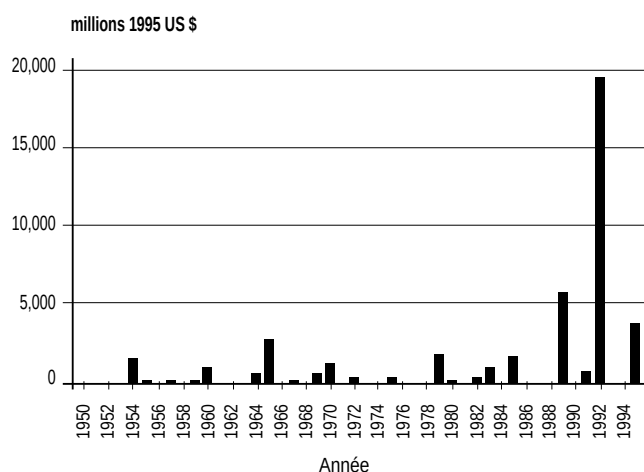
Les événements climatiques extrêmes représentent un problème de plus en plus préoccupant dans le monde. Les statistiques liées aux pertes économiques et aux pertes de vies humaines sont effarantes. Il importe cependant de distinguer la part de la hausse des pertes reliée à l'accroissement du nombre d'événements extrêmes, de celle qui est due à l'augmentation de la vulnérabilité de nos sociétés. En fait, c'est la définition même d'événement extrême qui est en cause. S'agit-il uniquement d'événements s'inscrivant dans les derniers 5 % ou le dernier 1 % de la courbe de distribution d'une donnée climatique (telle la température ou la précipitation) ou d'événements dont les conséquences sont extrêmes sur les plans financier et humain ? S'agit-il d'extrêmes sur le plan de la distribution ou de l'intensité ? Aussi, des événements qui ne sont pas extrêmes sur le plan des statistiques météorologiques pourraient le devenir d'un point de vue financier ou humain en raison d'une combinaison de facteurs socio-économiques.

Notre vulnérabilité aux événements extrêmes croît en raison de l'augmentation des populations, de l'urbanisation et de notre dépendance accrue aux infrastructures de communication, de transport et de distribution d'énergie, et en raison du vieillissement de ces infrastructures.

Pour le Canada, comme pour la plupart des économies développées, les pertes sont surtout financières. Ainsi, la sécheresse de l'année 2001-2002, l'événement climatique extrême le plus coûteux, a été estimé à 5 milliards de dollars. Deux autres événements coûteux sont survenus au Québec : la tempête de verglas de 1998 (4,2 milliards de dollars) et l'inondation du Saguenay de 1996 (1 milliard de dollars). En outre, la tempête de verglas a causé la mort de 25 personnes et laissé 3 millions de personnes sans électricité ni chauffage pendant plusieurs jours ou, dans certains cas, plusieurs semaines.

Figure 26

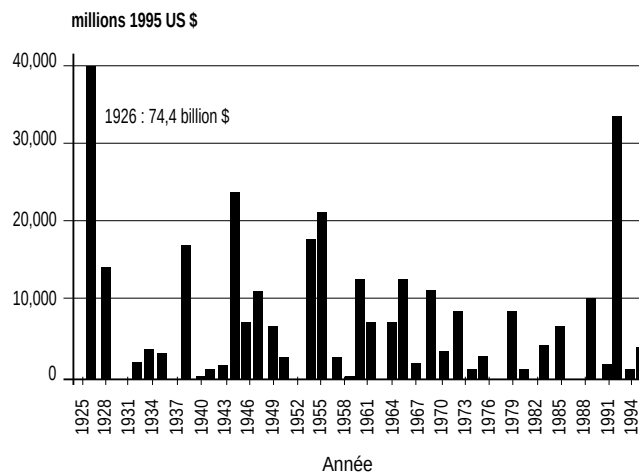
a) Dommages annuels dus aux ouragans aux États-Unis de 1950 à 1995 (Pielke et Landsea, 1998)



Un autre exemple de ce phénomène est celui des pertes reliées aux ouragans aux États-Unis où ils constituent les événements extrêmes les plus coûteux. La figure 26a montre l'historique des pertes financières assurées dues aux ouragans aux États-Unis de 1950 à 1995, en dollars américains de 1995 (Pielke et Landsea, 1998). La hausse croissante semble indiquer que les ouragans sont devenus plus fréquents et plus dommageables au cours des dernières décennies que par le passé, menant à des pertes de plusieurs milliards de dollars. Or, c'est plutôt une décroissance de la fréquence des ouragans qu'il faut constater au cours des dernières années. La tendance à la croissance des coûts ne serait donc pas due à une fréquence accrue des ouragans et de leur violence mais à la vulnérabilité croissante de la société aux effets des ouragans.

La figure 26b présente pour la période de 1925 à 1995, les valeurs résultant de la normalisation des pertes observées. Cette normalisation repose sur l'hypothèse que les pertes sont proportionnelles à trois facteurs : l'inflation, la population et la richesse. La normalisation donne une évaluation des pertes pour chacun des ouragans comme si ceux-ci s'étaient produits en 1995. Les données normalisées démontrent que l'équivalent de pertes de plusieurs milliards de dollars a été encouru au cours de plusieurs des décennies antérieures et non seulement dans le passé récent. Selon ces données normalisées, il y aurait ainsi eu sept années dans les années 40 et 60 où les pertes auraient excédé les 10 milliards de dollars comparativement à une année seulement dans les années 70 et 80. Les chercheurs concluent que « les données réfutent les énoncés récents selon lesquels la croissance rapide des dommages non normalisés dus aux éléments naturels est attribuable aux changements climatiques. Lorsque les changements dans l'inflation, la richesse et la population sont pris en compte, au lieu d'une croissance des dommages on assiste à une décroissance des pertes normalisées dans les années 70 et 80. »

b) Dommages annuels normalisés dus aux ouragans de 1925 à 1995 (Pielke et Landsea, 1998)



Ceci nous ramène au concept de vulnérabilité de la société dont on discutera plus loin sous la notion d'événements climatiques extrêmes.

La croissance de la vulnérabilité est réelle et s'appuie sur des faits, alors que la fréquence accrue des événements extrêmes causés par les changements climatiques est moins certaine. Toute analyse de l'impact des extrêmes sur la société doit prendre en compte ces deux facteurs. En fait, déterminer dans un avenir proche l'importance relative de ces deux facteurs dans l'impact des événements extrêmes sur l'économie du Québec et l'Est de l'Amérique du Nord demeure un défi.

À titre d'exemple, les relevés de Jean-François Gaultier, médecin du roi en Nouvelle-France au XVIII^e siècle, mentionnent qu'une tempête de verglas survenue les 22 et 23 décembre 1748 a laissé 8 cm de glace sur les toits et les murs des maisons de Québec. Les impacts d'une pareille tempête de verglas sur une ville industrialisée du XX^e siècle auraient été beaucoup plus dramatiques en raison de la vulnérabilité croissante des sociétés modernes aux aléas climatiques. À preuve, la tempête de verglas qui a frappé Montréal en janvier 1998, fut le second désastre naturel le plus coûteux au Canada. On voit donc que la vulnérabilité des sociétés aux événements climatiques extrêmes est une composante essentielle de l'étude de ces événements.

Impacts appréhendés

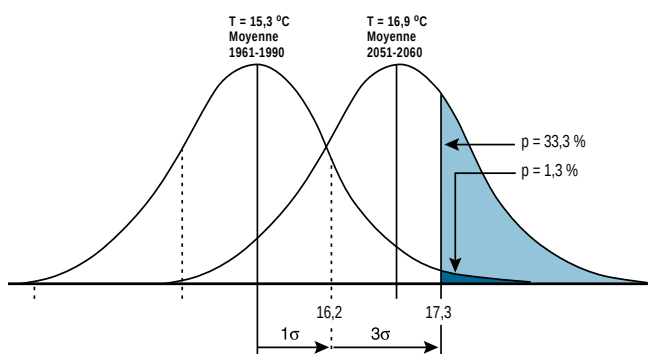
La vulnérabilité aux événements extrêmes demeure une question majeure, même s'il n'y avait pas de réchauffements climatiques dus aux activités humaines. Ce phénomène vient cependant ajouter une variable supplémentaire dans l'étude des impacts des événements climatiques extrêmes sur la société.

Plusieurs études ont porté sur la variabilité de la température et des précipitations et mis l'accent sur les événements climatiques extrêmes, à partir des données instrumentées des cent dernières années à l'échelle continentale. L'une d'elles (Karl *et al.*, 1995), portant sur les données de centaines de stations aux États-Unis, en Chine, en ex-Union soviétique et en Australie, couvre la période 1911-1994. Il apparaît que la variabilité intra-saisonnière de la température sur une durée de moins de 30 jours s'était généralement amoindrie dans l'hémisphère Nord au cours de la période avec une décroissance statistiquement significative pour les États-Unis. Par ailleurs la proportion des précipitations quotidiennes aux États-Unis provenant d'événements extrêmes (> 20 mm/jour) s'est de beaucoup accrue, alors que la proportion des événements légers (1-5 mm/jour) et modérés (5-10 mm/jour) aurait diminué. Cela signifie qu'en moyenne il y a eu un événement de précipitations extrêmes de plus tous les deux ans.

Pour plusieurs variables climatiques, dont la température, la distribution des fréquences épouse une courbe normale ou gaussienne. Les changements climatiques pourraient ainsi amener un changement de moyenne et de sa variance. Par exemple, une hausse de la moyenne des températures signifie des températures maximales plus élevées, mais pas nécessairement une modification de la variabilité (voir figure 27). Par contre, une modification de la variabilité sans changement de moyenne engendrerait un accroissement de la fréquence des extrêmes de froid et de chaleur ainsi que de l'importance de ces extrêmes. Une hausse de la moyenne et de la variabilité est aussi possible et occasionnerait des épisodes de chaleur plus fréquents et moins d'épisodes de froid intense. Il est souvent difficile de déterminer si les changements viennent d'une modification de la moyenne ou de la variabilité. Pour les variables météorologiques qui ne se rapprochent pas d'une distribution normale ou gaussienne, la situation est encore plus complexe.

Figure 27

Impacts des changements climatiques sur la fréquence des événements climatiques extrêmes (Environnement Canada)



Les extrêmes d'une variable météorologique se regroupent dans ce qu'on appelle communément la queue de la distribution (voir figure 27). Les changements de la fréquence des extrêmes peuvent être étonnamment considérables pour, en apparence, une faible variation de la moyenne. En d'autres mots, la queue de la distribution peut changer de façon disproportionnée par suite d'un petit changement de moyenne. Or, ce sont souvent les changements d'extrêmes et non pas de moyenne qui affecteront davantage les écosystèmes et les habitats humains.

Les modèles climatiques nous donnent une idée des changements de la fréquence des événements extrêmes qu'entraîneraient des températures plus élevées. Par exemple, avec deux fois plus de concentrations de CO_2 les précipitations extrêmes augmenteraient sur la plus grande partie du globe (Zwiers et Kharin, 1998). L'analyse des données sur les précipitations extrêmes au Canada, depuis 1990, ne démontre pas à

ce jour, une nette augmentation de leur fréquence (Zhang *et al.*, 2001). Par exemple, les séries temporelles portant sur le nombre moyen de précipitations intenses printanières dans quatre régions du Canada (l'Ouest, le Centre-Sud, le Centre-Nord et l'Est) sont caractérisées par une forte variabilité inter-décennale. Par contre, il y a une tendance à la hausse statistiquement significative dans l'Est du Canada (y compris le Québec). Il est possible que la tendance à la hausse des températures au Canada durant le XX^e siècle ne soit qu'un premier signe de la réponse atmosphérique au réchauffement du globe et que les changements dans les événements extrêmes ne soient pas encore apparents. Des travaux plus poussés sont absolument nécessaires pour déterminer la nature des événements extrêmes dans un monde dont le climat serait plus chaud.

Stratégies d'adaptation

Plusieurs stratégies d'adaptation s'offrent à la société pour faire face aux événements climatiques extrêmes. Dans chaque cas, une meilleure évaluation des risques constitue un élément essentiel de la stratégie.

Le premier type de stratégie porte sur l'aménagement du territoire ; il est en effet souvent moins coûteux d'éviter de construire en terrain potentiellement affecté par les inondations, l'érosion ou les vents violents que de construire de façon à résister aux intempéries. Une bonne part de la hausse des dommages causés au cours des dernières années provient de l'utilisation de terrains moins propices à l'aménagement, notamment en plaine inondable ou en bordure des cours d'eau et des étendues maritimes.

Le second type de stratégie consiste à redéfinir les normes de construction des bâtiments et des infrastructures pour ce qui est, par exemple, de la capacité de résistance aux vents et aux précipitations sous forme de pluie, de neige ou de verglas. Déjà, les événements climatiques extrêmes des dernières années ont amené les autorités publiques et les associations industrielles à revoir leurs normes en fonction d'une plus grande probabilité de ces événements. Des ouvrages de protection pourront aussi être réalisés, notamment en ce qui a trait à l'érosion côtière. Dans certains cas de grands projets, tel l'évacuateur de crue de la rivière Rouge, au Manitoba peuvent contribuer à réduire les vulnérabilités les plus importantes. Cette approche, bien que nécessitant des budgets supplémentaires, est en général moins coûteuse que la compensation des dommages.

Enfin, l'amélioration des systèmes de prévision météo contribuant à devancer la période d'alerte des événements extrêmes (ouragans, inondations et tornades) et la mise à jour des plans de mesure d'urgence sont aussi des moyens efficaces de réduire les coûts de ces événements sur les plans financier et humain.

Comme il n'est toutefois pas possible de parer à toute éventualité, les instruments de compensation financière et d'assurances continueront d'avoir un rôle important à jouer. Pour le moment, les gouvernements jouent un rôle prépondérant dans la compensation des désastres naturels ; si ceux-ci devaient augmenter sensiblement, d'autres mécanismes de financement pourraient être envisagés. Pour que l'industrie financière joue pleinement son rôle tout en assurant sa viabilité, on devra être plus précis dans l'évaluation des risques climatiques et l'appréciation des coûts associés aux événements extrêmes. L'augmentation de ces risques pourrait également amener l'industrie à développer de façon plus générale de nouveaux produits dérivés d'assurance fondés sur des indicateurs climatiques.

La caractérisation des événements extrêmes repose sur la disponibilité de séries de données historiques sur de longues périodes qui, par définition, sont rares. Plus les séries sont longues, plus le degré de confiance dans le caractère anormal d'un événement climatique extrême identifié est élevé. Les données instrumentées pour l'Amérique du Nord avec un bon niveau de couverture spatiale s'étendent sur environ 100 ans. Au-delà, les données sont plus sporadiques, tant dans l'espace que dans le temps. Les sources des données dépassant 100 ans comprennent les relevés personnels de divers individus et les données dérivées, comme les données provenant de la dendrochronologie (l'examen des anneaux de croissance des arbres).

En plus d'être rares, les événements extrêmes et leurs impacts sont souvent très locaux. Il est donc nécessaire de disposer de données à haute résolution spatiale pour les caractériser. Par exemple, les inondations du Saguenay de 1996 étaient le résultat de précipitations élevées sur une région de 5 000 km², soit à un niveau de résolution nettement plus fine que celle des modèles atmosphériques généraux. Ces modèles sont tout à fait appropriés pour simuler le comportement du système climatique dans son ensemble, mais ils sont inadéquats pour établir les caractéristiques à petite échelle de plusieurs événements extrêmes. Il est donc important d'établir les liens entre les événements extrêmes régionaux et les grands flux circulatoires de l'atmosphère de façon à pouvoir dériver des grands courants atmosphériques, les caractéristiques des événements extrêmes à petite échelle.





Sommaire et conclusion

L'ampleur et la rapidité du réchauffement du climat au cours du siècle dernier sont sans précédent dans l'histoire de l'humanité. En particulier, le climat de l'hémisphère Nord se serait réchauffé en moyenne de près de 0,6 °C depuis le début du XX^e siècle et la décennie 1990 aura été la plus chaude de toutes. Contrairement à certains épisodes antérieurs d'augmentation des températures, il s'agit là d'un phénomène observable à l'échelle de toute la planète.

Comme l'énonce le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), cette hausse des températures est attribuable pour l'essentiel à l'effet de serre accru créé par l'augmentation des concentrations des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère depuis le début de la révolution industrielle. Depuis 1750, la concentration du CO₂ a augmenté de 30 % pour atteindre 367 ppm en l'an 2000. Cette augmentation est due à 75 % à la croissance des émissions provenant de l'utilisation de combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel), la portion restante étant le résultat de changements survenus dans l'utilisation des sols, par exemple à la suite d'une déforestation. Les concentrations de plusieurs autres GES dont certains n'existaient pas avant l'industrialisation sont également en hausse.

DES ÉMISSIONS EN HAUSSE

Les émissions de CO₂ devraient continuer d'augmenter au cours des prochaines décennies, selon un éventail de scénarios relativement large. Si l'on peut espérer une certaine stabilisation des émissions dans l'ensemble des pays industrialisés à long terme, à la faveur d'une stabilisation des populations et de l'évolution des technologies, il importe notamment de tenir compte de l'importance croissante des émissions de GES des pays en développement et particulièrement des pays de l'Asie et du Pacifique, dans le bilan mondial. Or, ces pays dont le poids démographique est considérable devraient vraisemblablement réaliser, au cours des prochaines décennies, un rattrapage important sur le plan du niveau de vie et augmenter ainsi fortement leurs émissions de GES. Selon les scénarios du GIEC, les concentrations de CO₂ passeraient ainsi de 367 ppm en 2000 à un seuil variant de 540 à 970 ppm en 2100, soit de deux à trois fois et demie la concentration de référence de la période préindustrielle (280 ppm).

Les projections courantes sur la consommation énergétique mondiale laissent entrevoir des augmentations annuelles de 2 % des émissions de gaz à effet de serre pour les 25 prochaines années. Ceci est consistant avec des scénarios où les concentrations de CO₂ seraient égales à quatre fois la concentration de référence (4xCO₂), vers la fin ou le début du prochain siècle. De plus, pour la majorité des scénarios élaborés par le GIEC, les concentrations de CO₂ ne seraient pas stabilisées et continueraient de croître au prochain siècle. Stabiliser les concentrations à un niveau constant est d'autant plus difficile qu'il faut des centaines d'années aux systèmes océaniques et terrestres pour récupérer le CO₂ qui excède leur capacité d'absorption à l'équilibre.

Des niveaux de concentration de trois à quatre fois le niveau de concentration de référence, sont susceptibles d'apporter des changements climatiques difficiles à prévoir et hautement non linéaires qui risqueraient de faire basculer le climat de notre planète dans des régimes pour lesquels les coûts et les difficultés d'adaptation seraient énormes ou inacceptables. Il faudrait donc que les mesures de réductions permettent d'éviter l'atteinte de ces niveaux de concentrations. L'objectif devrait être de chercher à stabiliser la concentration en CO₂ à environ deux fois le niveau de référence (2xCO₂). Ceci exigera la réalisation d'engagements successifs équivalents à une dizaine de fois les objectifs du protocole de Kyoto, qui ne prévoit globalement qu'une diminution d'au plus 5 %, des émissions des pays industrialisés et en voie de transition.

En conséquence, il faut admettre qu'il est à peu près inévitable de devoir s'adapter à un nouveau climat planétaire sous l'effet de concentrations de gaz à effet de serre, qui auront au moins doublé par rapport à celles du début de la période industrielle.

UNE AUGMENTATION INÉVITABLE DES TEMPÉRATURES

Selon l'ensemble des scénarios et des modèles climatiques utilisés, les températures dans le monde augmenteraient en moyenne de 1,5 à 6 °C au cours du siècle. Sous les latitudes les plus nordiques, les hausses pourraient être supérieures d'environ 40 % à la moyenne. De plus, sous les latitudes nordiques moyennes et élevées, les précipitations devraient s'accroître au cours de la deuxième moitié du XXI^e siècle. Ces changements devraient être accompagnés de variations temporelles et régionales plus importantes ; en d'autres mots, les changements graduels envisagés à l'échelle mondiale risquent à l'échelle régionale d'être plus brusques et chaotiques.

Pour le Québec, selon divers modèles mondiaux de climat, ce sont dans un scénario moyen des augmentations de température en été de 2 à 3 °C dans le Sud (sous 50° N) avec des précipitations augmentant de 0 à 5 % qu'il faut envisager pour la fin du siècle. Dans le Nord (au-delà de 50° N), la même hausse des températures conduirait à une hausse des précipitations de 5 à 10 %. En hiver, les températures seraient plus élevées de 3 à 4 °C dans le Sud avec une augmentation importante des précipitations de 10 à 20 %, alors que dans le Nord, les températures augmenteraient de 4 à 5 °C avec des précipitations sous forme de pluie ou de neige plus élevées de 10 à 25 %.

Cependant, il faut ici rappeler que la résolution spatiale des modèles mondiaux de climat est de l'ordre de 400 km. Ces modèles n'indiquent donc que des tendances pour une région de la taille du Québec. Seule l'utilisation d'un modèle régional à plus haute résolution spatiale pourra, par exemple, préciser les effets locaux de la proximité d'étendues d'eau majeures, de montagnes, sur la circulation atmosphérique à grande échelle comme le courant jet, la trajectoire des tempêtes et des anticyclones. En plus d'avoir recours à un modèle climatique à plus haute résolution, il faudra aussi tenir compte de l'augmentation de l'évaporation associée aux températures plus élevées pour évaluer l'impact sur les divers secteurs d'activité, telles les forêts, l'agriculture ou la production hydroélectrique.

LES IMPACTS PAR RÉGIONS

Pour bien mesurer les impacts des changements climatiques, il apparaît nécessaire de considérer l'ensemble des secteurs touchés de même que l'évolution attendue du milieu humain et naturel. Seule une approche globale permet, en effet, de replacer dans leur contexte une multiplicité de phénomènes et d'en saisir l'effet combiné. Il est également utile d'unifier l'analyse en procédant à partir d'hypothèses communes sur l'évolution des principaux paramètres du climat. Une telle approche permet de tenir compte des impacts cumulatifs et intersectoriels.

D'une superficie d'environ 1 700 000 km², le Québec est immense. Du sud au nord, le Québec s'étend sur environ 2 000 km et sur environ 1 500 km d'est en ouest. Les changements climatiques seront donc relativement contrastés sur les différentes parties du territoire. Les données concernant le territoire et les formations géologiques, le climat et les zones de végétation ainsi que la population, l'économie et l'emploi nous amènent à considérer la problématique des changements climatiques au Québec en fonction de quatre régions distinctes : l'Arctique québécois, la région Ressources, la région Maritime et le Sud du Québec. Pour chacune de ces régions, l'impact des changements climatiques risque de se faire sentir de façon différente, en raison non seulement de l'importance des changements climatiques qui surviendront, mais aussi de la réaction de l'environnement naturel et humain à ces changements.

L'Arctique québécois

La région de l'Arctique québécois est probablement celle qui subira les plus importants changements quant au climat et à la modification de son environnement, notamment avec la fonte appréhendée d'une grande partie de son pergélisol. Même si les populations touchées sont peu nombreuses, les contraintes de son territoire notamment sur le plan de l'éloignement et de l'étendue et de son climat rendent l'adaptation plus complexe.

La fonte du pergélisol

Dans cette région, c'est la fonte du pergélisol qui inquiète davantage. Aux endroits où le pergélisol est peu épais et se situe près de 0 °C, la fonte pourra être très rapide, n'étant retardée que par la chaleur latente de fusion de la glace. Dans certains cas, la stabilité du bâti existant ne pourra plus être assurée, entraînant des risques pour les résidences, les bâtiments et les infrastructures actuels. Des tassements et des glissements de terrain pourraient survenir sur les pentes présentant de ce fait un danger pour les habitations environnantes. Les villages, en partie ou en totalité, construits sur des sols argileux, riches en glace, pourraient connaître des dommages importants et nécessiter d'ici quelques années des mesures d'atténuation d'impacts et d'adaptation pouvant comprendre des relocalisations plus ou moins importantes. De plus, les nouvelles constructions et les nouveaux aménagements devront dorénavant tenir compte du réchauffement climatique et de la dégradation inévitable du pergélisol que celui-ci engendrera. Ces changements dans l'environnement arctique auront aussi des conséquences sur les écosystèmes et indirectement sur les populations autochtones vivant de chasse et de pêche. La modification de la saison d'enneigement perturbera l'accessibilité au territoire et modifiera la durée des saisons de chasse et pêche et les rendements.

La région Ressources

Plus au sud, dans la région Ressources du plateau laurentien recouverte de forêts de conifères, c'est l'impact potentiel des changements climatiques sur les grands réservoirs et les grandes exploitations forestières, qui revêt une importance économique majeure tant pour l'ensemble du Québec que pour les populations de cette région. L'étendue du territoire demande une analyse qui tient compte des phénomènes climatiques propres à chaque sous-région ou bassin versant.

Les forêts

Plusieurs études ont montré qu'une augmentation de température et des concentrations de CO₂ pourrait avoir un effet positif sur la croissance et la productivité de plusieurs essences forestières. Par contre, les changements climatiques pourraient favoriser la croissance des populations d'insectes nuisibles, les maladies et la recrudescence d'événements climatiques extrêmes tels les verglas, vents violents et sécheresses. De même, bien que les études selon les périodes examinées ne concluent pas toutes à un plus grand risque d'incendies, une sécheresse accrue additionnée à une plus grande fréquence des orages devrait normalement entraîner une plus grande fréquence des feux de forêt. Comme l'industrie forestière est très importante dans l'économie québécoise, les impacts des changements climatiques sur les forêts auraient forcément des conséquences très significatives sur la société québécoise.

Malheureusement, les connaissances sur l'impact des changements climatiques sur les forêts sont pour le moment parcellaires et incomplètes. Des études concernant la réaction de certaines plantes à des changements environnementaux ont été réalisées, mais il faudrait mieux connaître leur réaction dans leur milieu naturel en situation de concurrence avec d'autres espèces.

La production hydroélectrique

Le Québec dispose d'une puissance électrique installée de plus de 40 000 mégawatts (MW), lui permettant de satisfaire plus de 41 % de ses besoins énergétiques totaux, dont au-delà de 80 % proviennent d'installations hydroélectriques situées au nord du 49° parallèle, dans la région Ressource. À ceci s'ajoute un potentiel théorique aménageable de 45 000 MW dont une bonne partie pourrait être additionnée à la production existante.

Tant sur le plan économique que sur celui de la sécurité énergétique des québécois, il est évidemment important de déterminer les impacts des changements climatiques sur le parc de production existant. Il est tout aussi important d'en tenir compte pour les aménagements à venir puisque les constantes de temps de l'évolution du climat correspondent tout à fait à celles de la planification des grands ouvrages hydroélectriques. De plus, comme l'hydroélectricité offre des avantages énormes par rapport à l'utilisation des hydrocarbures du point de vue de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, elle est appelée à être utilisée et développée à son plein potentiel dans les décennies à venir.



Les scénarios climatiques présentement disponibles laissent entrevoir que le bilan hydrique, malgré la hausse des températures et de l'évaporation, permettrait d'amener plus d'eau dans les réservoirs du Nord québécois. Toutefois, il est important de noter que les modèles de climat mondiaux utilisés pour ces évaluations ont beaucoup de difficulté à décrire correctement les conditions climatiques d'un Québec nordique, entouré d'eau et très sensible aux variations des régimes de temps tels que l'oscillation de l'Atlantique Nord (ONA), difficilement prise en compte par les modèles globaux. Par exemple, l'absence prolongée de glace sur la baie d'Hudson devrait entraîner des apports accrus sur la partie nord-ouest du Québec. Par ailleurs le régime de temps ONA, qui domine les hivers nordiques depuis un certain nombre d'années, est défavorable aux apports printaniers, primordiaux pour l'hydraulique. Il importe donc de consentir des efforts majeurs pour développer les outils et les modèles qui permettront une meilleure compréhension des divers phénomènes, notamment à l'aide d'une plus grande résolution spatiale, afin de mieux anticiper la climatologie des prochaines décennies pour les diverses régions du Québec.

La région Maritime

Pour ce qui est de la région Maritime, en raison du rehaussement du niveau de la mer, de la diminution de la période d'englacement et de la possibilité d'une amplification des tempêtes, elle pourrait connaître une accentuation des problèmes d'érosion côtière.

L'érosion côtière

L'élaboration de stratégies adéquates d'adaptation à ces nouvelles conditions, qu'il s'agisse de zonage, de retrait ou de protection des rives, exige la disponibilité de données fiables sur les conditions géologiques, les niveaux maritimes tout autant que sur le régime des vents. Les données sur le niveau de la mer sont nombreuses mais incomplètes, puisqu'elles visaient, jusqu'à ce jour, essentiellement à répondre aux besoins de sécurité pour la navigation ou à documenter des projets d'amélioration d'infrastructures portuaires. Les questions d'érosion au Québec n'ont jamais fait l'objet d'un suivi attentif et de campagnes de mesures spécifiques. L'absence d'analyse de récurrence des tempêtes constitue une lacune majeure pour la conception des ouvrages de protection à laquelle les ministères québécois tentent maintenant de pallier par de nouveaux programmes de mesures.

Comme la population, les axes de transport et l'économie de cette région sont très fortement concentrés en bordure de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent, l'impact pourrait s'y faire sentir très largement. Le désir des populations d'habiter généralement près du rivage vient accentuer cette problématique. L'accentuation de l'érosion côtière aurait des impacts importants notamment en coûts d'infrastructures municipales et routières, mais aussi en dommages aux propriétés résidentielles et commerciales situées au bord de la mer.

La région Sud du Québec

Quant à la région Sud du Québec, sise dans la plaine du Saint-Laurent et les Appalaches où se concentre la grande majorité de la population et des activités économiques, elle sera atteinte de plusieurs manières. L'agriculture, le tourisme, les transports terrestre et maritime, la demande d'énergie, la gestion de l'eau, la santé, les habitats humains et les écosystèmes sont autant d'aspects qui seront touchés directement et indirectement dans cette région.

Les écosystèmes et la biodiversité

La préservation des écosystèmes et de la biodiversité est l'une des préoccupations majeures liées aux changements climatiques. Plus encore que les économies et les milieux humains qui, grâce aux technologies, sont capables de s'adapter aux changements de toute nature, les milieux naturels risquent d'être frappés par la rapidité et l'ampleur des changements. On trouve au Québec quelques espèces fauniques parmi les plus à risque : les oiseaux migrateurs qui utilisent les milieux humides côtiers et les milieux arctiques, les amphibiens et les reptiles de même que les espèces qui se servent des glaces arctiques. Le réchauffement rapide de l'Arctique présente une problématique tout à fait particulière pour la faune terrestre et aquatique de cette région. De même, les écosystèmes aquatiques et les milieux humides bordant les lacs et rivières seraient particulièrement menacés, en raison de la baisse des niveaux d'eau et des hausses de température de l'eau, qui pourraient en découler. Enfin, la hausse du niveau moyen des océans, en provoquant une augmentation de la salinité de certains secteurs du Saint-Laurent et de l'embouchure des tributaires qui s'y déversent, où l'eau est actuellement saumâtre ou douce, imposerait diverses perturbations à la faune et la flore aquatiques et des milieux humides de la région maritime.

La région Sud, qui présente une grande diversité biologique, risque d'être particulièrement touchée. Traversée par le Saint-Laurent, on y retrouve entre autres le lac Saint-Pierre, réserve mondiale de la biosphère, qui abrite diverses espèces aquatiques parmi les plus à risque. Dans cette région en particulier, la combinaison de l'augmentation de la température et des autres stress environnementaux, imposés par une activité humaine multiple et prédominante, ainsi que la perte ou la diminution de l'aire des habitats pourrait amener la disparition de plusieurs espèces d'animaux et de plantes, les changements climatiques excédant leurs capacités migratoires. Il est impossible de prédire si les habitats détruits seront remplacés par de nouveaux types d'habitats aussi diversifiés ou si des habitats semblables pourront s'implanter ailleurs.

L'agriculture, le transport maritime et routier, et le tourisme

Certaines industries notamment l'agriculture, le transport et le tourisme, devront modifier leur façon de faire pour réduire les coûts occasionnés par les changements climatiques et profiter des avantages que ceux-ci pourraient apporter.

En agriculture, les impacts varieront considérablement selon les types d'activités agricoles – culture céréalière, plantes fourragères, arbres fruitiers, horticulture ou élevage. Ces modifications pourraient avoir des conséquences sur la rentabilité de l'industrie agricole en fonction des stratégies d'adaptation adoptées. La disponibilité de l'eau constitue l'un des enjeux majeurs des changements climatiques pour cette industrie. En effet, il semble que l'agriculture pourra s'adapter assez efficacement au réchauffement des températures par les choix de ses cultures si elle peut compter sur une bonne irrigation.



La température et l'humidité jouent des rôles déterminants dans la distribution géographique des mauvaises herbes, des agents pathogènes et de l'entomofaune agricole. Sous de nouvelles conditions climatiques, on s'attend à l'arrivée de nouvelles espèces et à des changements dans les populations ennemies des cultures. Une plus grande variabilité des températures et des précipitations aura des impacts à la fois positifs et négatifs sur les interactions hôtes-parasites. Des efforts supplémentaires seront nécessaires pour s'assurer que les systèmes de prévision des maladies et des insectes ravageurs des cultures soient efficaces sous des conditions climatiques plus variables. Plus que dans tout autre secteur, l'adaptation sera importante en agriculture, allant de changements de façons de faire chez les agriculteurs à la révision des programmes d'assurances pour faire face à une réalité climatique plus incertaine.

En transport, les enjeux majeurs résident dans – la détermination des mesures requises pour assurer l'intégrité des infrastructures de transport considérant l'érosion côtière accrue par la hausse du niveau de la mer et les événements météorologiques extrêmes – évaluation des conditions nécessaires pour assurer la pérennité du transport maritime sur le Saint-Laurent, compte tenu de la fluctuation appréhendée des niveaux d'eau – l'identification des ajustements aux pratiques de viabilité hivernale causées par des variations du régime de précipitations et des cycles gel/dégel – et la mesure des impacts sur les infrastructures routières et aéroportuaires du Nord du Québec en raison des nouvelles conditions géomorphologiques induites par la fonte du pergélisol.

Le tourisme est l'une des activités économiques parmi les plus importantes risquant d'être affectée par les changements climatiques de façon négative et positive. En effet, dans bien des cas le climat est l'une des principales ressources naturelles sur laquelle est fondée l'activité touristique, soit directement (soleil, beau temps, neige et glace) ou indirectement (paysages et végétaux). Ainsi face à un réchauffement des températures, les centres de ski pourraient devoir effectuer des investissements supplémentaires pour maximiser leur enneigement. D'autres activités hivernales, dans le Sud du Québec tels le ski de randonnée ou la motoneige, pourraient connaître des difficultés croissantes. Par contre, plusieurs autres activités récréatives bénéficieraient largement d'un adoucissement des températures, qu'il s'agisse des activités nautiques, du golf, des autres sports d'extérieur ou encore de la marche en forêt favorisant ainsi l'ensemble de l'industrie touristique québécoise.

La santé humaine et la demande d'énergie

Sur le plan de la santé humaine, des étés plus chauds comportant de plus longues périodes de canicule et une dégradation de la qualité de l'air, particulièrement dans le sud, entraîneraient une augmentation du taux de mortalité et de maladies respiratoires et cardiovasculaires, même si une acclimatation progressive pourrait réduire de beaucoup l'impact initial. Il pourrait y avoir aussi un accroissement des maladies infectieuses et du stress, du niveau de tensions sociales et psychologiques ainsi que des risques pour la santé au travail. Les personnes âgées et les enfants seraient les plus vulnérables ainsi que les personnes ayant des problèmes respiratoires et cardiovasculaires, les travailleurs (ceux qui travaillent à l'intérieur comme à l'extérieur) et les populations urbaines défavorisées comme les citoyens à faible revenu et les sans-abri. Les événements récents en Europe ont montré la très grande vulnérabilité de certaines populations à une augmentation importante et soutenue des températures.

Les mesures privilégiées pour réduire les impacts sanitaires associés aux changements climatiques relèvent des stratégies reconnues de la santé publique telles qu'une surveillance accrue, la sensibilisation du grand public et des gestionnaires, l'adaptation des infrastructures (équipements de traitement de l'eau, bâtiments publics et privés) au nouveau contexte, la formation des intervenants et le développement de la recherche dans ce domaine. Comme l'acclimatation est très importante, le changement des habitudes de vie et de travail (notamment le travail physique) durant ces périodes peut aussi influencer sur les conséquences des vagues de chaleur. La mise en place d'un système de veille/avertissement de chaleur accablante constitue aussi un moyen complémentaire à privilégier, de même qu'un renforcement significatif des systèmes de surveillance pour les maladies aiguës qui sont reliées aux événements extrêmes et zoonoses.

Enfin, la climatisation et une bonne hydratation constituent les solutions les plus appropriées à court terme lors d'une hausse des températures accompagnée de périodes de canicule prolongées. À cet égard, rappelons que le taux de climatisation est beaucoup moins élevé à Montréal qu'à Toronto.

Sur le plan de la demande d'énergie, les besoins de chauffage devraient diminuer dans les secteurs résidentiel ainsi que commercial et institutionnel alors que les besoins en climatisation augmenteront. Cependant, comme la consommation d'énergie pour fins de chauffage est au Québec très largement supérieure à celle de la climatisation, les changements climatiques devraient se traduire par une réduction des besoins totaux ainsi que par une diminution encore plus importante de la demande de pointe, plus coûteuse à satisfaire. Dans l'ensemble, il pourrait s'agir d'économies annuelles croissantes atteignant plusieurs centaines de millions de dollars. À l'inverse, on peut prévoir que, dans les marchés voisins au sud du Québec, la diminution des besoins de chauffage sera plus que compensée par l'augmentation des besoins de climatisation en été amenant une expansion des marchés d'exportation.

La gestion de l'eau

Les modifications combinées de température et de précipitations occasionneront, selon toute vraisemblance, une diminution des écoulements des principaux tributaires du Saint-Laurent au cours des mois de juillet à septembre, ce qui pourrait entraîner des difficultés plus fréquentes pour les municipalités qui s'alimentent à partir de ceux-ci, les amenant à modifier leur système d'approvisionnement en eau. Les baisses et les augmentations saisonnières des débits et du ruissellement causées par une modification du régime pluviométrique auront des conséquences directes sur le transport, le temps de séjour et la dilution des polluants, de même que sur la température de l'eau et, par conséquent, sur sa qualité.

Au niveau du drainage urbain, les changements climatiques pourraient se traduire par une augmentation de la fréquence des événements de précipitations extrêmes causant, dans les cas d'une gestion déficiente des eaux pluviales, des refoulements, inondations et débordements sans traitement dans le milieu récepteur.

Enfin, la baisse des débits et le réchauffement des températures, notamment en saison estivale, pourraient créer ou accentuer des situations de conflits d'usage dans certaines régions du Québec s'approvisionnant à partir des lacs et rivières tributaires du Saint-Laurent. L'augmentation des températures entraînerait une augmentation des besoins en eau des populations urbaines et rurales à des fins domestiques et récréatives alors que l'agriculture exigerait davantage d'irrigation. Pour le fleuve, des choix pourraient devoir être effectués entre les besoins de la navigation commerciale qui requiert de plus hauts niveaux d'eau à l'automne et ceux des municipalités dont l'approvisionnement en eau est plus critique en été.

Les événements climatiques extrêmes et la variabilité naturelle

Bien qu'il existe un fort degré de confiance sur l'augmentation prévisible des événements climatiques extrêmes dans le contexte des changements climatiques, les modèles climatiques existant ne permettent pas de prédire avec précision l'ampleur de l'augmentation de ce type d'événement ni leur distribution. L'expérience récente a par ailleurs montré que les événements climatiques même de moyenne ampleur et a fortiori ceux de très grande ampleur ont des conséquences économiques majeures croissantes. Ce phénomène tient en particulier à la richesse accrue de nos sociétés. La vulnérabilité croissante des économies modernes en raison du haut niveau de dépendance technologique, qui les caractérise, est aussi un facteur aggravant.

L'ADAPTATION NÉCESSAIRE

La revue des impacts appréhendés et des pistes de solution montre que dans la plupart des cas, des interventions ciblées peuvent considérablement réduire le coût des impacts négatifs et même dans plusieurs cas, permettre d'en tirer un bénéfice appréciable. La mise en oeuvre de mesures d'adaptation, qui peuvent relever d'une meilleure identification des zones à risque, de la révision des normes de conception des bâtiments et des équipements ou encore de l'investissement préventif en de nouvelles capacité de production ou de nouvelles infrastructures de service, peut permettre d'en réduire substantiellement les effets négatifs. D'autre part, le Québec étant une région nordique, un réchauffement modéré du climat devrait vraisemblablement l'avantager dans certains secteurs économiques et vis-à-vis de certains marchés externes. Il sera toutefois important d'identifier ces impacts positifs et d'adopter des mesures pour prendre avantage de ces changements.

La conception de ces mesures requiert une analyse détaillée qu'il n'est souvent pas encore possible de réaliser à ce stade-ci. Dans bien des domaines, le niveau d'incertitude est élevé tant sur l'ampleur des impacts que sur leur nature et la vitesse à laquelle ils s'imposeront. Il est important de faire le lien avec les statistiques historiques, en tenant compte toutefois que les variations climatiques historiques ne sont plus garantes du futur et ne permettent plus nécessairement d'estimer correctement le niveau de risque. En particulier, pour les événements climatiques extrêmes, il n'est pas souhaitable d'attendre que le signal devienne statistiquement significatif avant d'agir. Il s'agit en effet de développer une approche de gestion de risques dans un monde incertain.

Un des aspects fréquemment noté est le peu d'information précise dont dispose les chercheurs tant sur les impacts reliés aux variations climatiques que sur les variations à une échelle relativement longue. Des données existent sur les variations de température et de précipitations au cours du siècle dernier, mais les séries historiques sont souvent incomplètes et elles ne sont disponibles principalement que pour des endroits généralement au Sud du Québec alors que plus au Nord, les réseaux de collecte de données ont été largement négligés.

Pour évaluer les impacts régionaux, il faut prévoir les variations de températures, les niveaux de précipitations et les bilans hydriques avec une résolution spatiale suffisamment élevée, les modèles climatiques globaux ayant une capacité prédictive relativement faible à l'échelle des bassins versants, des écozones, et des régions urbaines et rurales. Or la définition des mesures d'adaptation qu'il s'agisse d'irrigation, de changement de type de culture, d'aménagements hydroélectrique, de dragage de la voie maritime du Saint-Laurent requiert de telles prévisions avec un haut degré de confiance. À court terme, il s'avère donc stratégique de mieux cerner les vulnérabilités et les risques tout en investissant dans une science du climat générant des scénarios plus précis et applicables aux échelles régionales.

UNE SOLUTION GLOBALE

Les impacts potentiels sont importants et dans certains cas déjà mesurables. La solution optimale face aux changements climatiques consiste à réduire, le plus rapidement possible, les émissions de gaz à effet de serre de façon à minimiser les impacts appréhendés. Cela étant dit, un certain nombre de changements sont inéluctables dans la mesure où l'augmentation des concentrations est déjà un fait acquis et où la réduction des émissions, à un niveau permettant une stabilisation des concentrations, prendra beaucoup de temps. Il est à espérer que la concertation internationale appuyée par le développement technologique permettra de limiter les émissions à des niveaux acceptables.

L'adaptation aux changements climatiques sera donc nécessaire et constitue un volet essentiel et complémentaire à l'action visant à réduire les émissions de GES. À cette fin, un travail d'analyse, entrepris suffisamment tôt, constitue la première étape d'une véritable stratégie d'adaptation visant à minimiser les coûts ou prendre avantage des opportunités. L'analyse doit porter à la fois sur l'évolution des données climatiques et leurs liens avec les impacts biophysiques. De plus, il est nécessaire d'obtenir des scénarios de prévisions, qui correspondent dans le temps et dans l'espace aux impacts sectoriels potentiels identifiés. Si les modèles généraux de climat peuvent être utiles aux premières évaluations, ils ne sont pas adéquats pour établir des évaluations précises des impacts régionaux. Seuls des modèles régionaux à plus fine résolution, encore à l'étape du développement et de la validation, sont susceptibles d'apporter des réponses pertinentes. En attendant ces modèles, l'identification des vulnérabilités constitue une première phase de l'analyse.

L'analyse des impacts biophysiques et économiques constitue la deuxième étape de la stratégie d'adaptation. Souvent les changements climatiques viendront accentuer une problématique existante ou émergente. Par exemple, de nombreux autres éléments en dehors des changements climatiques sont responsables des dangers pesant sur la biodiversité alors que les dommages croissants dus à l'érosion côtière sont souvent davantage reliés à l'augmentation de la valeur des aménagements riverains qu'aux changements climatiques eux-mêmes.

Cette analyse ne peut cependant pas se faire en vase clos et demande la participation du plus grand nombre possible d'intervenants. Cette participation est nécessaire pour que les analyses portent sur les vraies questions et les bons indicateurs de vulnérabilité. Une étroite collaboration entre les analystes et les acteurs socioéconomiques est aussi la garantie de la mise en œuvre des mesures d'adaptation identifiées. Si la mobilisation des spécialistes est nécessaire pour attaquer les enjeux prioritaires pour la société, elle doit se faire de concert avec l'implication des décideurs.

L'adaptation aux changements climatiques comporte un éventail de solutions en fonction de l'horizon temporel. Elle comprend la sensibilisation des populations concernées à de nouveaux types de comportements, le développement de produits adaptés ou la modification des critères de conception des équipements et la définition de nouvelles politiques, et de nouveaux programmes et règlements. Souvent l'adaptation aux changements climatiques peut s'intégrer à des mesures visant d'autres fins et se marier à de saines pratiques de gestion de risque. Enfin, il importe de mentionner qu'une bonne partie de l'adaptation est spontanée et n'a qu'à être facilitée ou orientée.

LE CONSORTIUM OURANOS

C'est l'ensemble de ces considérations qui a mené à la mise en place d'Ouranos, un consortium de recherche sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques. Ouranos constitue une formule de partenariat unique centrée sur des livrables intégrés dans quatorze grands programmes qui couvrent essentiellement les problématiques décrites dans le présent document. Ouranos fait travailler en équipe, outre ses ressources propres, des professionnels provenant de plusieurs organismes : huit ministères du Gouvernement du Québec, le Service météorologique d'Environnement Canada, Hydro-Québec, l'UQAM, l'INRS, Laval et McGill. De nombreux autres organismes (universités, fondations, fonds subventionnaires) sont impliqués et contribuent dans le cadre de projets spécifiques. Les activités d'Ouranos permettent de rejoindre au-delà de 250 chercheurs et spécialistes issus de plusieurs dizaines d'organismes et d'assurer la cohésion de ces travaux en fonction des besoins réels des décideurs. Près d'une centaine de ces chercheurs et spécialistes sont réunis dans les locaux d'Ouranos au centre-ville de Montréal, à proximité de l'UQAM, de l'Université McGill, d'Hydro-Québec et de plusieurs autres intervenants.

Ouranos a pour mission de favoriser l'acquisition de connaissances pour mieux évaluer les changements climatiques régionaux et leurs impacts environnementaux, sociaux et économiques. Le mandat d'Ouranos est de mettre à la disposition de ceux et celles qui ont le devoir de prévoir et prévenir, un savoir précis, prospectif et fiable à propos de l'évolution du climat et de l'adaptation aux changements qui y sont liés. À cet effet, il développe ou adapte les outils nécessaires pour fournir aux décideurs, les scénarios de changements climatiques détaillés à l'échelle régionale ainsi que l'évaluation des impacts sectoriels appréhendés de façon à optimiser les stratégies d'adaptation.

L'une des premières tâches dévolue à Ouranos est la mise en forme des banques de données climatiques historiques de sources diverses, de façon à disposer de données cohérentes sur les différentes variables climatiques et hydrologiques sur les plus longues périodes de temps possibles et aux échelles spatiales pertinentes. Ce travail exigeant est indispensable à la bonne conduite des études menées par l'ensemble des chercheurs d'Ouranos. Le rôle d'Ouranos est également de fournir un service d'accès aux banques de données climatiques et hydrométriques (données de base, données dérivées et métadonnées).

Ouranos est également responsable du développement de scénarios détaillés d'évolution du climat du Québec, à moyen et long termes. Deux approches complémentaires sont poursuivies afin de produire, à partir des modèles climatiques mondiaux à faible résolution, des résultats à une échelle spatiale et temporelle d'intérêt pour l'évaluation des impacts pour une région ou une problématique spécifique. Une première méthode fait appel au Modèle régional canadien du climat (MRCC) pour ramener à une échelle plus fine les résultats des modèles mondiaux de climat. Cette approche est très prometteuse, mais aussi très exigeante en personnel spécialisé, en moyen de calculs et en archivage informatique. Ouranos est doté de superordinateurs qui permettront de produire une première série de simulations à l'échelle de 45 km pour toute l'Amérique du nord dès 2004. Ultérieurement, des projections de changements climatiques, pour plusieurs scénarios d'augmentation de gaz à effet de serre et plusieurs versions de modèles mondiaux, qui alimentent le modèle régional, seront produites afin de mieux caractériser l'incertitude inhérente à de telles projections. Simultanément, Ouranos poursuit des travaux de perfectionnement du modèle régional sur, entre autres, le couplage avec les mers intérieures, un schéma de surface multiniveaux et l'écoulement hydrologique. La deuxième méthode pour ramener les grandes échelles des modèles de projection du climat à une échelle locale fait appel à des méthodes statistiques qui établissent un lien entre les résultats des modèles de climat et les séries de données historiques pour une région spécifique. Cette approche statistique de mise à l'échelle peut utiliser des modèles mondiaux ou, si une résolution plus élevée est souhaitée, un modèle régional.

De nombreux projets sont en cours portant sur les thématiques et domaines prioritaires décrits dans ce document. Étant donné l'importance des ressources hydroélectriques pour le Québec, Ouranos consacre une attention particulière aux processus physiques qui conditionnent le régime hydrologique des bassins versants nordiques en fonction des précipitations, des températures et de certains phénomènes climatiques tels que les régimes de temps. La validation du MRCC, à partir de données historiques pour certains bassins versants, permettra d'obtenir des projections pour les conditions hydrologiques des prochaines décennies. Certains autres projets portent sur l'évolution de la fonte du pergélisol dans les villages du Nord québécois, l'analyse de la progression de l'érosion côtière face aux tempêtes et au rehaussement marin, les stratégies d'adaptation de la voie commerciale du Saint-Laurent, les systèmes de gestion des eaux des municipalités et du secteur agricole. D'autres analyses portent sur les impacts appréhendés des changements climatiques sur les écosystèmes, la vitesse des vents, les perturbations sur les forêts, le tourisme et la santé.

Les différentes activités d'Ouranos devraient ainsi permettre de dresser un portrait global et précis des impacts appréhendés des changements climatiques pour le Québec au cours des prochaines décennies en fonction de divers scénarios. Ce portrait est essentiel pour aider les décideurs à mieux planifier leurs interventions et investissements de façon à mieux s'adapter et ainsi réduire les coûts des changements et même, dans plusieurs cas, en tirer profit.



DÉFINITIONS

Acclimatation :	Processus d'adaptation d'une espèce à un nouveau climat.
Albédo :	Mesure de la lumière réfléchie par un objet. Les objets clairs ont un albédo élevé et les sombres, un albédo plus faible.
Barachois :	Petit port situé derrière un banc de sable émergé.
Bois d'œuvre :	Bois ayant subi une première transformation.
Bois franc :	Espèces d'arbres feuillus dont le bois est d'une dureté relativement élevée.
Centrale au fil de l'eau :	Centrale de production d'électricité alimentée directement par un cours d'eau et ne disposant pratiquement d'aucune réserve créée artificiellement. Sa puissance varie donc suivant le débit du cours d'eau
Centrale thermique :	Centrale produisant de l'énergie électrique à partir de l'énergie thermique. Parmi les centrales de ce type, on retrouve notamment les centrales thermiques classiques, les centrales nucléaires, les centrales à moteurs diesels et les centrales à turbines à gaz.
Chrysomèle :	Insecte coléoptère.
Crue maximale probable :	La plus forte crue susceptible de se produire en un point d'un cours d'eau en supposant que soient combinées les pires conditions météorologiques et hydrologiques dans la région.
Cultivar :	Variété d'une espèce végétale dont les caractères communs sont intéressants pour l'agriculture, la foresterie ou l'horticulture.
Déficit hydrique :	Différence cumulée entre l'évapotranspiration potentielle et les précipitations pendant une période où ces dernières sont inférieures à l'évapotranspiration.
Déforestation :	Changement d'affectation des sols de la forêt vers un autre usage (ex. : agricole, urbain).
Degré-jour de chauffage :	Mesure de la différence entre la température moyenne d'un jour donné par rapport à une température de référence et qui exprime les besoins de chauffage domestique.
Dendrochronologie :	Méthode de datation des événements passés ou des changements climatiques par l'étude des anneaux de croissance des arbres.
Effet régulateur :	Réduction des écarts entre les minimums, les maximums et la moyenne, notamment des débits d'eau.
Élasticité :	Sensibilité ou intensité de réaction d'une grandeur, par rapport à la variation d'une autre. Rapport entre les taux d'accroissement (en pourcentage) de deux variables ; une élasticité égale à 1 signifie que la valeur de la première augmente dans la même proportion que la seconde. Ex. : l'augmentation de la demande d'énergie pour fins de climatisation et l'augmentation de la température.
Endurcissement :	Mécanisme naturel d'adaptation des plantes vivaces notamment au froid.
Engrais vert :	Culture semée pour être enfouie dans le sol afin de protéger celui-ci contre l'érosion et d'améliorer son niveau de fertilité.
Entomofaune :	Communauté des arthropodes (insectes, araignées et acariens nuisibles et utiles) qui se retrouvent dans un milieu.

Évaporation (taux d') :	Quantité d'eau transformée en vapeur et provenant des nappes liquides.
Évapotranspiration (taux d') :	Quantité d'eau évaporée par le sol et la transpiration des plantes.
Événement extrême :	Un événement extrême est un événement rare selon les statistiques relatives à sa fréquence en un lieu donné. Si la définition du mot rare varie considérablement, un phénomène météorologique rare devrait normalement être aussi rare sinon plus, que les 10e ou 90e percentile. Par définition, la notion d'événement extrême varie selon les endroits.
Fécondité (taux de) :	Rapport des naissances vivantes, à un groupe de femmes, durant une période donnée, généralement une année.
Flèches littorales :	Forme littorale allongée de terrain constituée par l'accumulation de matériaux meubles (sable ou galets) s'avancant dans la mer en pointe de flèche avec un point d'ancrage à une extrémité seulement.
Forçage climatique :	Perturbation du bilan énergétique terrestre.
Forçage hydrologique :	Perturbation du régime hydrique causée par les changements climatiques.
Forçage radiatif :	Modification du bilan radiatif causée par une substance telle qu'un gaz ou une modification de l'albédo.
Frasil :	Cristaux ou fragments de glace entraînés par le courant et flottant à la surface d'un cours d'eau ; pellicule formée par la glace qui commence à prendre.
Gaule :	Terme générique désignant un jeune arbre plus gros qu'un semis mais plus petit qu'un arbre adulte, tige.
Glace de ségrégation :	Glace formée par la migration de l'eau dans les sols de texture fine jusqu'à l'interface entre le sol gelé et le sol non gelé où elle adopte la forme de lentilles bien distinctes.
Glissements régressifs :	Glissement dû au dégel du sol dans lequel une paroi raide recule par tranche et une coulée de débris composée de sédiments et d'eau de fonte s'écoule au loin.
Hydraulicité :	Apports naturels en eau d'une période donnée, en général une année.
Hydrologique :	Relatif à l'étude des eaux (cycle, bilan, régime, condition, événement).
Isostatique :	Qualifie les mouvements de rehaussement ou d'affaissement de l'écorce terrestre venant compenser les variations de masse en surface, tels la formation ou la fonte des glaciers, la formation de montagnes ou encore des phénomènes d'érosion ou de sédimentation.
Limnologique :	Qui se rapporte à la science ayant pour objet l'étude biologique et physique des lacs.
Lutte phytosanitaire :	Ensemble de pratiques utilisées pour préserver la santé des végétaux.
Luzernière :	Prairie constituée uniquement de luzerne.
Mollisol :	Couche superficielle du sol soumise aux alternances de gel et de dégel au-dessus d'un pergélisol.
Morbidité (taux de) :	Rapport entre le nombre des malades et l'effectif total d'une population donnée.
Mortalité (taux de) :	Rapport entre le nombre de décès et l'effectif total d'une population.

Natalité (taux de) :	Rapport entre le nombre de naissances par année dans un groupe et l'effectif de ce groupe.
Nunavik :	Partie du territoire du Québec située au nord du 55 ^e parallèle.
Pergélisol :	Tout sol ou toute roche dont la température se maintient sous 0° C pendant au moins deux années consécutives.
Périphyton :	Ensemble des organismes (bactéries et algues) vivant à la surface de la végétation aquatique ennoyés.
Pessière :	Forêt composée majoritairement d'épinettes.
Photosynthèse :	Processus métabolique des plantes utilisant la chlorophylle et la lumière solaire.
Phytoprotection :	Protection des plantes contre les ravageurs, les maladies et les mauvaises herbes.
Plante vivace :	Plante qui repousse à chaque année.
Plante fourragère :	Tout végétal servant à la nourriture du bétail.
Radier :	Revêtement, plateforme généralement en région arctique de matériaux granulaires qui recouvre le sol et sert de fondation aux bâtiments.
Régime climatique :	Ensemble des variations du climat en fonction du temps.
Régularisation :	Action d'aménager un cours d'eau en réduisant les écarts entre les périodes de crues et d'étiage.
Réseau hydrométrique :	Ensemble des stations hydrologiques et des postes d'observation situés dans une zone donnée (bassin fluvial, région administrative) de manière à permettre l'étude des régimes hydrologiques.
Résineux :	Groupe d'arbres produisant de la résine et des cônes (conifères) et possédant pour feuilles des aiguilles. Se dit aussi du bois de ces arbres.
Saison de croissance :	Période où les conditions de température d'humidité et de luminosité sont adéquates pour la croissance d'une culture donnée, celle-ci variant selon l'espèce ou le cultivar.
Smog :	Terme provenant de la contraction des mots anglais smoke et fog. Pollution étendue de l'atmosphère par des aérosols, due en partie à des phénomènes naturels et en partie aux activités humaines.
Squat :	Surenfoulement dans l'eau d'un navire dû à la vitesse de déplacement.
Stockage annuel :	Accroissement des réserves d'eau pendant une année.
Stockage pluriannuel :	Accroissement des réserves d'eau pendant plusieurs années.
Stress hydrique :	Stress causé aux plantes ou aux animaux en raison d'un manque d'eau.
Système hydrique :	Bassin versant dont le débit est régularisé par la mise en place d'ouvrages de génie civil (barrages, centrales ou autres).
Taïga :	Forêt monospécifique de conifères, composée à plus de 80 % d'épinettes.

Taux de gain pour le bétail :	La croissance relative d'un animal, mesurée par son gain de poids pendant une période spécifique
Toundra :	Territoire nordique caractérisé par l'absence d'arbres et la présence d'arbustes, de lichens et de mousses.
Trophique :	Relatif aux différents niveaux de la chaîne alimentaire.
Troposphère :	Partie de l'atmosphère comprise entre le sol et la stratosphère.
Unité thermique du maïs :	Système d'indexation basé sur le total de chaleur accumulée pendant la période de croissance du maïs, calculé à partir des températures minimales et maximales de la journée.
Zoonose :	Maladie transmissible des animaux aux humains.

OUVRAGES DE RÉFÉRENCE

- ALLARD, M., FORTIER, R., DUGUAY, C. et BARRETTE, N. 2002. «A trend of fast climate warming in northern Quebec since 1993, Impacts on permafrost and man-made infrastructures». *American Geophysical Union, 2002 Fall Meeting*. Moscone Center, San Francisco, California.
- ALLARD, M. et SEGUIN, M. K. 1987. « Le pergélisol au Québec nordique : bilan et perspectives ». *Géographie physique et Quaternaire*, 41 : 141-152.
- ALLEN, M. R. et INGRAM, W. J. 2002. «Constraints on Future Changes in Climate and the Hydrologic Cycle». *Nature*, vol. 419, 224-232.
- BANTON, O. 1998. « Comment gérer les ressources d'eau souterraines du Québec » dans Villeneuve, J.-P., A.N. Rousseau et S. Duchesne. 1998. *Symposium sur la Gestion de l'eau au Québec, volume 1 : Recueil de Textes des Conférenciers*. Université du Québec, INRS-Eau, Québec, Canada. p. 49-68.
- BEAULIEU, H. et HUOT, M. 1993. *Liste des espèces de la faune vertébrée susceptibles d'être désignées menacées ou vulnérables*. Gouvernement du Québec, Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, 107 p.
- BÉGIN, Y. 2001. «Tree-ring dating of extreme lake levels at the sub-arctic-boreal interface». *Quaternary Research*, 55: 133-139.
- BÉLANGER, G., ROCHETTE, P., CASTONGUAY, Y. et BOOTSMA, A. 2001. *Impact des changements climatiques sur les risques de dommages hivernaux aux plantes agricoles pérennes*, Final Report for Climate Change Action Fund, Project A084, Ressources naturelles Canada.
- BÉLANGER, G., ROCHETTE, P., CASTONGUAY, Y., BOOTSMA, A., MONGRAIN, D. et RYAN, D. A. J. 2002. «Climate change and winter survival of perennial forage crops in Eastern Canada». *Agronomy Journal*, 94: 1120-1130.
- BERGERON, Y., GAUTHIER, S., KAFKA, V., LEFORT, P. et LESIEUR, D. 2001. «Natural Fire Frequency for the Eastern Canadian Boreal Forest: Consequences for Sustainable Forestry». *Revue canadienne de recherche forestière*, 31: 384-391.
- BERGERON, Y. et LEDUC, A. 1998, «Relationships between change in fire frequency and mortality due to spruce budworm outbreaks in the southern Canadian boreal forest». *Journal of Vegetation Science*, 9: 492-500.
- BIBEAULT, J.-F. et RIOUX, D. 2003, *Analyse de sensibilité de la plaisance aux variations de niveaux d'eau pour le fleuve Saint-Laurent : lac Saint-Louis au lac Saint-Pierre*, Rapport soumis au groupe de travail sur la Plaisance et le Tourisme nautique, Commission mixte internationale, Environnement Canada, Centre Saint-Laurent, 52 p.
- BIRD, E.C.F. 1985, *Coastline changes, a global review*, Wiley, Chichester, 219 p.
- BISE (Bulletin d'information en santé environnementale), Aquaculture et cyanobactéries, Volume 8 - Numéro 2 - Mars-avril 1997 ; voir http://www.inspq.qc.ca/bulletin/bise/1997/bise_8_2.asp?Annee=1997#aquaculture.
- BOER, G. J., FLATO, G. M. et RAMSDEN, D. 2000. «A transient climate change simulation with greenhouse gas and aerosol forcing: Projected climate for the twenty-first century». *Climate Dynamics*, 16(6):427-450.
- BOURGAULT, D. 2001. *Circulation and Mixing in the St. Lawrence Estuary*, thèse de doctorat, Department of Atmospheric and Oceanic Sciences and Centre for Climate and Global Change Research, Université McGill, Montréal. 127 p. et annexes.
- BROOKS, J. R., FLANAGAN, L. B. et EHLERINGER, J. R. 1998, «Responses of Boreal Conifers to Climate Fluctuations: Indications from Tree-Rings Widths and Carbon Isotope Analyses», *Revue canadienne de recherche forestière*, 28: 524-533.
- BRUCE, J., BURTON I., MARTIN H., MILLS B. et MORTSCH, L., 2000. *Le secteur eau : vulnérabilité et adaptation aux changements climatiques*. Document de travail pour les ateliers régionaux préparé avec l'appui du Fonds d'action pour le changement climatique. Ressources naturelles Canada.
- BRYANT, C. R., SMITH, B., BRKLACICH, M., JOHNSTON, T. R., SMITHERS, J., CHIOTTI, Q. et SINGH, B. 2000. «Adaptation in Canadian agriculture to climatic variability and change», *Climatic Change*. 45: 181-201.

- BUREAU D'AUDIENCES PUBLIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT. 2000. *L'eau, ressource à protéger, à partager et à mettre en valeur*. Rapport de la Commission sur la gestion de l'eau au Québec, N° 142, tome I, 478 p.
- CARTER, K. K. 1996. «Provenance tests as indicators of response to climate change in 10 temperate tree species». *Revue canadienne de recherche forestière*, 26 : 1089-1095.
- CAYA, D et LAPRISE, R, 1999, «A semi-implicit Semi-Lagrangian Regional Climate Model: The Canadian RCM», *Monthly Weather Review*, 127:341-362.
- CENTER FOR INTERNATIONAL EARTH SCIENCE INFORMATION NETWORK, 2000, *Preparing for Climate Change in the Metropolitan East Coast Region: The Potential Consequence of Climate Variability and Change*, Metropolitan East Coast Regional Assessment. Columbia University.
- CHURKINA, G. et RUNNING, S. W. 2000. «Investigating the Balance between Timber Harvest and Productivity of Global Coniferous Forests under Global change», *Climatic Change*, 47: 167-191.
- COMITÉ ASSOCIÉ DE RECHERCHE GÉOTECHNIQUE. 1988. *La terminologie du pergélisol et notions connexes*, Sous-comité du pergélisol, Conseil national de recherches du Canada, Note de service technique n° 142, Ottawa, 154 p.
- COMMISSION MIXTE INTERNATIONALE. 1993. *Les mesures destinées à atténuer les conséquences néfastes des fluctuations des niveaux d'eau du Saint-Laurent et des Grands Lacs*. Rapport présenté aux gouvernements du Canada et des États-Unis. 57p.
- COURCHESNE, F., ROY, A.G., BIRON, P.M., CÔTÉ, B., FYLES, J. et HENDERSHOT, W.H., 2001, Fluctuations of climatic conditions, elemental cycling and forest growth at the watershed scale. *Environmental Monitoring and Assessment*, 67, 161-177.
- COX, R. M. et MALCOM, J. W., 1997. «Effects of winter thaw on birch die-back and xylem conductivity: An experimental approach with *Betula papyrifera* L». *Tree Physiology*, 17: 389-396.
- SECRÉTARIAT DE LA CONVENTION SUR LA DIVERSITÉ BIOLOGIQUE, 2002, *Convention sur la diversité biologique*.
- DE JONG, R., LI, K. Y., BOOTSMA, A., HUFFMAN, T., ROLOFF, G. et GAMEDA, S. 2001. *Crop yield and variability under climate change and adaptive crop management scenario*. Final report for Climate Change Action Fund, Project A080. Ressources naturelles Canada.
- DELFINO, R. J., MURPHY-MOULTON, A M, BURNETT, R. T, BROOK, J. R, BECKLAKE, M. R., 1997, *Effects of air pollution on emergency room visits for respiratory illnesses in Montreal, Quebec*. *Am J Respir Crit Care Med*. 1997 Feb;155(2):568-76.
- DELISLE, A., 1998. « Un portait à jour de l'eau au Québec. » dans Villeneuve, J.-P., Rousseau, A.N. et Duchesne, S., 1998. *Symposium sur la Gestion de l'Eau au Québec, Volume 1 : Recueil de Textes des Conférenciers*. Université du Québec, INRS-Eau, Québec, Canada. p. 18-26.
- DUMAS, P., 1989, *La fluctuation des niveaux du lac Saint-Louis : Bilan et perspectives*, Comité intermunicipal du lac Saint-Louis. 72 p.
- COMMISSION MIXTE INTERNATIONALE. 1993. *Les mesures destinées à atténuer les conséquences néfastes des fluctuations des niveaux d'eau du Saint-Laurent et des Grands Lacs*. Rapport présenté aux gouvernements du Canada et des États-Unis. 57 p.
- ENVIRONNEMENT CANADA, 1997a, *Chapitre québécois de l'étude pan-canadienne sur l'adaptation à la variabilité et au changement climatique : Tome V*, par Luc Bergeron, Gérald Vigeant et Jacinthe Lacroix.
- ENVIRONNEMENT CANADA, 1997b, *L'étude pan-canadienne sur l'adaptation à la variabilité et au changement climatique : Tome VII, Questions sectorielles*, Chapitre 1 : Changement et variabilité climatiques : Impacts sur l'eau du Canada.
- ENVIRONNEMENT CANADA, 1997c. *L'étude pan-canadienne sur l'adaptation à la variabilité et au changement climatique : Tome VII, Les secteurs stratégiques d'intérêt national*, Chapitre 8 : Secteur des transports.
- ENVIRONNEMENT CANADA, 2002. *Portrait de la biodiversité du Saint-Laurent*.

EASTERLING, D. R., MEEHL, G. A., PARMESAN, C., CHANGNON, S., KARL, T. R. et MEARN, L. O., 2000. «Climate extremes: Observations, modeling and impacts». *Science*, 289, 2068-2074.

FAGNAN, N., BOURQUE, É., MICHAUD, Y., LEFEBVRE, R., BOISVERT, É., PARENT, M. et MARTEL, R., 1999. « Hydrogéologie des complexes deltaïques sur la marge nord de la mer de Champlain ». *Hydrogéologie*, 4: 9-22.

FLANNIGAN, M. D., STOCKS, B. J. et WOTTON, B. M., 2000. «Climate Change and Forest Fires». *Science of the Total Environment*, 262: 221-229.

FLANNIGAN, M. D., 1998. «Ontario's climate in the 21st century», in *The impact of climate change on Ontario's forests*. S. J. Colombo, L. J. Buse, M. L. Cherry, C. Graham, S. Greifenhagen, R. S. McAlpine, C. S. Papadapol, W. C. Parker, R. Scarr, M. L. Ter-Mikaelian et M. D. Flannigan, Ontario Forest Research Institute, Forest research paper no. 143, pp. 50.

FORBES, D. L. et SHAW, R. W., 2002, *Coastal impacts of climate change and sea-level rise on Prince Edward Island*, Geological Survey of Canada.

FRIGON, A., CAYA, D., SLIVITZKY, M., et TREMBLAY, D., 2002. «Investigation of the hydrologic cycle simulated by the Canadian Regional Climate Model over the Quebec/Labrador territory», dans Beniston, M. (ed), *Climatic Change: Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management, Advances in Global Change Research*. 10. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht and Boston, pp. 31-55.

FURGAL, C. M., MARTIN, D., GOSSELIN, P., VIAU, A. et NUNAVIK REGIONAL BOARD OF HEALTH AND SOCIAL SERVICES. 2002, *Climate Change and Health in Nunavik and Labrador: What we know from Science and Inuit Knowledge*, Report submitted to the Climate Change Action Fund – Adaptation Liaison Office. Nunavik Nutrition and Health Committee, Labrador Inuit Association, Labrador Inuit Health Commission.

GAGNÉ, J., 2000. Conférence lors de l'Atelier sur les impacts et l'adaptation aux changements climatiques – Saint-Hyacinthe. Mars 2000.

GARNEAU, M., 2000. *Un temps de changement – Le changement climatique au Québec*, Affiche murale, Ressources naturelles Canada, Commission géologique du Canada.

GAULTIER, J.-F., 1748. *Journal des observations météorologiques de M. Gaultier à Kebec depuis le 1^{er} octobre 1747 jusqu'au 1^{er} octobre 1748*. Observatoire de Paris, Manuscrit, Doc. N° 64-6A, 71 p. [Fonds Joseph-Nicholas Delisle, Observatoire de Paris, 61, avenue de l'Observatoire, Paris 75014, France].

GOLDBERG, M.S., BURNETT, R.T., BAILAR, J. C. 3RD, BROOK, J., BONVALOT, Y., TAMBLYN, R., SINGH, R., VALOIS, M.F., VINCENT, R., 2001, *The association between daily mortality and ambient air particle pollution in Montreal, Quebec*. 2. *Cause-specific mortality*. Environ Res. 2001 May; 86(1):26-36.

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES, 2001 a). *Bilan 2001 des changements climatiques : Les éléments scientifiques*. Contribution du Groupe de travail I au Troisième Rapport d'évaluation du GIEC.

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES, 2001 b). *Bilan 2001 des changements climatiques : Conséquences, adaptations et vulnérabilité*. Contribution du Groupe de travail II au Troisième Rapport d'évaluation du GIEC.

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES, 2001 c). *Bilan 2001 des changements climatiques : Mesures d'atténuation*. Contribution du Groupe de travail III au Troisième Rapport d'évaluation du GIEC.

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES, 2001 d). *Bilan 2001 de l'évolution du climat : Troisième Rapport d'évaluation, Rapport de synthèse du GIEC*.

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES 2000. *Special report on emissions scenarios*.

- GOSSELIN, P., GRONDIN, J., 2002. *Changing behaviours in a time of climate change: Social science perspectives on the health impact assessment of climate change and adaptive behaviours*. Report on a workshop held in Quebec City on August 27-28, 2002. Bureau du Changement climatique et de la santé, Santé Canada et Institut national de santé publique du Québec (INSPQ), Québec.
- HENDERSON-SELLERS, A. 1989, «North American total cloud amount variations this century». *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Global and Planetary Change* Sect. 75: 175-194.
- HOFGAARD, A., TARDIF, J. et BERGERON, Y. 1999, «Dendroclimatic Response of Picea Mariana and Pinus Banksiana along a Latitudinal Gradient in the Eastern Canadian Boreal Forest». *Revue canadienne de recherche forestière*, 29: 1333-1346.
- HOUGHTON, J. T., DING, D. J., GRIGGS, M., NOGUER, P. J., VAN DER LINDEN, X., DAI, K., MASKELL, K et JOHNSON, C. A. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of the Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, New York, NY.
- HUDON, C. 1997. «Impacts of Water level fluctuation on St-Lawrence river aquatic vegetation», *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*.
- HULME, M. A. et SHEARD, N. 1999. *Climate Change Scenarios for Canada*, Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich, UK. 6 p.
- HUNT, R., HAND, D. W., HANNAH, M. A. et NEAL, A. M. 1991. «Response to CO₂ enrichment in 27 herbaceous species». *Functional Ecology*, 5: 410-421.
- INSTITUT DE LA STATISTIQUE DU QUÉBEC, 1999, *Perspectives démographiques du Québec 1996-2041*.
- INSTITUT QUÉBÉCOIS D'AMÉNAGEMENT DE LA FORÊT FEUILLUE. 2003. *Changements climatiques : impacts sur les forêts québécoises*, Revue de littérature, 48 p.
- INSTITUT NATIONAL DE SANTÉ PUBLIQUE DU QUÉBEC (INSPQ), 2003, *Le changement climatique, Enjeu majeur de santé publique pour les Québécois*, présentation par R. Massé et L. Drouin à la Commission parlementaire des transports et de l'environnement, 20 février 2003.
- KARL, T. R., KNIGHT, R. W. et PLUMMER, N. 1995. «Trends in high frequency climate variability in the twentieth century». *Nature*, 377, 217-220.
- KAYA, Y., 1990: *Impacts of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios*. Paper presented to the IPCC Energy and Industry Subgroup, response Strategies Working group, Paris
- KORNER, C. 1993. CO₂ fertilization: the great uncertainty in future vegetation development, in *Vegetation dynamics and global change*. A.M. Salomon et H.H. Shugart (Eds), Chapman & Hall, New York, p. 338.
- LAMOTHE, A. M. et PÉRIARD, G. 1987. *Prospective du changement climatique pour les ressources naturelles du Québec, phase 1 : L'industrie du ski alpin*. Rapport d'Environnement Canada, 142 p.
- LAMOTHE, A. M. et PÉRIARD, G. 1988. *Répercussions d'un changement climatique sur l'industrie du golf au Québec*. Rapport d'Environnement Canada, 81 p.
- LANGLOIS, C. et al. 1992. *Synthèse des connaissances sur les communautés biologiques du lac Saint-Pierre*, Zone d'intérêt n° 11, Rapport technique, Environnement Canada – Région du Québec, Conservation et Protection. Centre Saint-Laurent, 236 p.
- LAPRISE, R., CAYA, D., GIGUÈRE, M., BERGERON, G., CÔTÉ, H., BLANCHET, J.-P., BOER, G. et McFARLANE, N. 1998. «Climate of Western Canada under current and enhanced greenhouse gas concentration as simulated by the Canadian Regional Climate Model». *Atmosphere-Ocean*, 36 (2): 119-167.
- LAPRISE, R., D. CAYA, A. FRIGON et D. PAQUIN. 2003. «Current and perturbed climate as simulated by the second-generation Canadian Regional Climate Model (CRCM-II) over north-western North America», *Climate Dynamics* (accepté).

- LAST, J. M. et CHIOTTI, Q. P. 2001. «Climate Change and Health», *Isuma*, Vol. 2, n° 4, Winter/Hiver 2001, p. 62-69.
- LEHOUX, D. 1996. *Restauration naturelle des rives du Saint-Laurent entre Cornwall et l'île d'Orléans*, Guide d'intervention, Environnement Canada, Service canadien de la faune, Ministère des Transports du Québec, Société d'énergie de la baie James, Canards Illimités Canada et Les Consultants en environnement ARGUS inc.
- LOFGREN, B. M., QUINN, F. H., CLITES, A. H., ASSEL, R. A., EBERHARTD, A. J. et LUUKKONNEN, C. L. 2002. *Evaluation of Potential Impacts on Great Lakes Water Resources Based on Climate Scenarios of Two GCMs*, International Association of Great Lakes Residents, 2002.
- MALCOLM, J. R. et MARKHAM, A. 2000. *Global warming and terrestrial biodiversity decline*. World Wildlife Fund for Nature, Suisse.
- MALTAIS, D., ROBICHAUD, S. et SIMARD, A., 2001, *Désastres et Sinistrés*, Les Éditions JCL Inc., Chicoutimi.
- McCULLOCH, M. M., FORBES, D. L. et SHAW, R. W. 2002. *Coastal impacts of climate change and sea level rise on Prince Edward Island*. Commission géologique du Canada, Dossier public 4261.
- McGUFFIE, K. et HENDERSON-SELLERS, A. 1988. «Is Canadian cloudiness increasing?» *Atmosphere-Science*, 26: 608-633.
- MINGELBIER, M. et LEPAGE, S. 2000. *The use by fish of managed marshes along the fluvial St. Lawrence and relations with water level variations in the river*. Conférence devant l'International Association of Great Lakes Research (IAGLR), Cornwall, Ontario.
- MINGELBIER, M., TRENCIA, G., DUMAS, R., DUMAS, B., MAILHOT, Y., BOUCHARD, C., MANOLESCO, D. C., BRODEUR, C., HUDON, C. et OUELETTE, G. 2001. *Avis scientifique concernant la mortalité massive des carpes dans le Saint-Laurent durant l'été 2001*. Société de la faune et des parcs du Québec, Ministère de l'Environnement, Biodôme de Montréal, Environnement Canada.
- MINISTÈRE DU CONSEIL EXÉCUTIF. 1997. *Symposium sur la gestion de l'eau au Québec*. Document de référence. Gouvernement du Québec, 59 p.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA FAUNE. 1997. *L'eau potable au Québec : un second bilan de sa qualité : 1989-1994*. Gouvernement du Québec, 36 p.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DU QUÉBEC. 1999. *La gestion de l'eau au Québec – Document de consultation publique*. Gouvernement du Québec, Envirodoq : EN981414.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT. 2000. *Plan d'action québécois 2000-2002 sur les changements climatiques*. Gouvernement du Québec Envirodoq : ENV2000-0173.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT. 2002a. *L'eau. La vie. L'avenir. Politique nationale de l'eau*. Gouvernement du Québec. Envirodoq : ENV/2002/0310.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT 2002b. *Projet de stratégie québécoise sur la diversité biologique 2002-2007*. Gouvernement du Québec.
- MINISTÈRE DU LOISIR, DE LA CHASSE ET DE LA PÊCHE, MINISTÈRE DES AFFAIRES MUNICIPALES et SECRÉTARIAT ARCHIPEL. 1986. *Étude de faisabilité - Évaluation des effets sur l'environnement – Annexe 18 : La gestion optimale pour la flore, la faune et les loisirs*. Rapport technique n° 4, Gouvernement du Québec, Projet archipel.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES 2001. *Évolution de la demande d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre au Québec : scénario de référence 1996-2021*. Gouvernement du Québec.
- MORNEAU, F., MICHAUD, M., LECOURS, F., CÔTÉ, L. et ROY, D. 2001. *Étude d'impacts sur l'environnement : Projets de protection des berges le long de la route 132 autour de la péninsule gaspésienne*. Gouvernement du Québec, Ministère des Transports du Québec, 84 pages.
- MORIN, J et BOUCHARD, A., *Les bases de la modélisation du tronçon Montréal /Trois-Rivières*. Rapport scientifique, Service météorologique du Canada, Hydrométrie RS-100. Environnement Canada, Sainte-Foy, 55 p.

- MORSTCH, L. D. et QUINN, F. H. 1996. «Climate change scenarios for Great Lakes Basin ecosystem studies». *Limnol, Oceanography*, 41(5): 903-911.
- MORTSCH, L. D., HENGVELD, H., LISTER, M., LOFGREN, B., QUINN, F., SLIVITZKY, M. et WENGER, L. 2000. «Climate change impacts on the Hydrology of the Great Lakes-St. Lawrence System». *Canadian Water Resources Journal*, 25(2): 153-179.
- MOULTON, R.J. et CUTHBERT, D.R. 2000. «Cumulative impacts/risk assessment of water removal loss from the Great Lakes – St. Lawrence River system». *Canadian Water Resources Journal*, 25(2) : 181-208.
- MYER, R. O. et BUCKLIN, R. A. 2002. «Effect of seasons (summer vs fall) and diet nutrient density on performance and carcass characteristics of growing-finishing swine ». *Transactions of the ASAE*, 45 807-811.
- NORTHERN ECOSYSTEM INITIATIVE, *Identifying, Selecting and Monitoring Indicators of Climate Change in Nunavik and Labrador*.
- PAINCHAUD, J., GUAY I. et MARANDA, Y. 2002. *L'action du ministère de l'Environnement en vue de la gestion durable de l'eau*. Vecteur Environnement, p. 38-40.
- PAYETTE, S. et ROCHEFORT, L. (éd.) 2001. *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*, Les Presses de l'Université Laval, 621 p.
- PEARCE, F. 1998. *Let's leave our children a living planet*. World Wildlife Fund.
- PICARD, J-L, *Atlas l'Actuel*. Montréal, Éditions CEC inc., 1994. 160 pages.
http://www.gouv.qc.ca/Vision/Territoire/Index_Territoire_fr.html
- PIELKE JR, R. A. et LANDSEA, C. W., «Normalized Hurricane Damages in the United-States: 1925-95», *American Meteorological Society Journal*, September 1998.
- RESSOURCES NATURELLES CANADA. 2002 a. *Foresterie – Impacts et adaptation liés au changement climatique : perspective canadienne*. Direction des impacts et de l'adaptation liés au changement climatique, octobre 2002. Gouvernement du Canada.
- RESSOURCES NATURELLES CANADA. 2002 b. *Les ressources en eau – Impacts et adaptation liés au changement climatique : perspective canadienne*. Direction des impacts et adaptation liés au changement climatique. Ottawa. 17 p.
- RIZZO, B. et WILKEN, E. 1992. «Assessing the sensitivity of Canada's forests to climatic change». *Climatic Change*, 21: 37-55.
- ROSE, J. B., DAESCHNER, S., EASTERLING, D. R., CURRIERO, F. C., LELE, S. et PATZ, J. E. 2000. «Climate and waterborne disease outbreaks». *Journal of AWWA*, 92(9): 77-87.
- ROUSSEAU, A.N., MAILHOT A. et VILLENEUVE, J.-P. 2003. « Connaissons-nous bien la capacité de nos bassins versants et aquifères régionaux à fournir de l'eau potable à la population du Québec sous de nouvelles conditions climatiques. » *Recueil de conférences du 26^e Symposium sur les eaux usées & 15^e Atelier sur l'eau potable*, organisé par Réseau Environnement en partenariat avec le ministère des Affaires municipales, Sports et Loisir, Ville de Laval, Québec, 2003, 261-267.
- ROUSSEAU, A.N., MAILHOT, A. et VILLENEUVE, J.-P. 2000. *La gestion de l'eau par bassin versant: Problématique, éléments de solution et exemples d'application du système informatisé GIBSI*. Vecteur Environnement 33(5): 27-30, 51-54.
- SCOTT, D., McBOYLE, G. et MILLS, B. 2002. *A reassessment of climate change and the skiing industry in Southern Ontario (Canada): exploring technical adaptive capacity*. Proceedings of 16th International Congress on Biometeorology, Oct. 28-Nov. 1, Kansas City, USA. Paper 16A.2
- SCOTT, D., JONES, B., LEMIEUX, C., McBOYLE, G., MILS, B., SVENSON, S. et WALL, G. 2002. *The Vulnerability of Winter recreation to Climate Change in Ontario's Lakeland Tourism Region*, Department of Geography, University of Waterloo, Waterloo, Ontario.

- SCOTT, D., Mc BOYLE, G. et MILLS, B. 2003. «Climate change and the skiing industry in southern Ontario (Canada): exploring the importance of snowmaking as a technical adaptation». *Climatic Research*, 23(2): 171-181.
- SIMARD, A. 2002. *Portrait de la qualité de l'eau des rivières du Québec*. Vecteur Environnement. 35(6) : 46-51.
- SINGH, B., BOIVIN, J., KIRKPATRICK, G., HOULE, B. et HUM, B. 1995. «Automatic Irrigation Scheduling System (AISSUM): principles and applications», *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 121, No. 1, 43-56.
- SIONIT, N., ROGERS, H. H., BINGHAM, G. E. et STRAIN, B. R. 1984. «Photosynthesis and stomatal conductance with CO₂-enrichment of container- and field-grown soybeans», *Agronomy Journal*. 76: 447-451.
- SLIVITZKY, M. 1998. dans : Villeneuve, J.-P., Rousseau, A. N et Duchesne, S. 1998. *Symposium sur la Gestion de l'eau au Québec, volume 1 : Recueil de textes des conférenciers*. Université du Québec, INRS-Eau, Québec, Canada. p. 69-83.
- SLONOSKY, V. C. 2003. «The meteorological observations of Jean-François Gaultier», Québec, Canada 1742-56». *Journal of Climate*.
- SMITH, J., LAVENDER, B., SMIT, B. et BURTON, I. 2001. « Stratégies d'adaptation en vue de réduire la vulnérabilité des Canadiens aux changements climatiques ». *Isuma*, vol. 2, n° 4, Winter/Hiver 2001, p. 70-77.
- STACHOWICZ, J.J., TERWIN, J.R., WHITLATCH, R.B., OSMAN, R.W. 2002. «Linking climate change and biological invasions: Ocean warming facilitates non-indigenous species invasions». *Evolution and Ecology*. University of California, Davis 95616, USA.
- SYLVESTRE, M., et GRENIER, C. 1987. *L'eau souterraine, une ressource à exploiter*. Ministère de l'Environnement du Québec. Envirodoq 870035.
- CENTER FOR INTERNATIONAL EARTH SCIENCE INFORMATION NETWORK, 2000. (CIESIN) Columbia University. «Preparing for Climate Change in the Metropolitan East Coast Region: The Potential Consequence of Climate Variability and Change, Energy». *Climate Change and a Global City, an Assessment of the Metropolitan East Coast Region*.
- VILLENEUVE, J.-P., MAILHOT, A. ET SALVANO, E. 2001. *Problématique de l'approvisionnement et de l'utilisation de l'eau potable dans la nouvelle ville de Québec. Tome I. Rapport préliminaire final. Rapport de recherche no. R-610*. INRS-ETE. Sainte-Foy. 122 p.
- WALL, G., 1998 a. «Impacts of climate change on recreation and tourism ». dans Mayer, N et Avis, W. (eds.). *Responding to Global Climate Change; National Sectoral Issues*. (Volume XII) of the Canada Country Study; Climate Impacts and Adaptation, Environnement Canada.
- WALL, G., 1998 b. «Implications of Global Climate Change for Tourism and Recreation in Wetland Areas». *Climatic Change*, Vol. 40: 371-389.
- WETTSTEIN, J. J. et MEARNS, L. O. 2002. «The Influence of the North Atlantic Oscillation on Mean, Variance, and Extremes of Temperatures in the Northeastern United States and Canada». *Journal of Climate*, 15, 3586-3600.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2000, by Kovats, R.S., Menne, B., McMichael A.J. et al, 2000. *Climate change and human health: impact and adaptation*. Geneva.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2001, *Monitoring Health Impacts of Climate Change in Europe*, Meeting report. London, UK. 34 p.
- WORLD HEALTH ORGANISATION, WORLD METEOROLOGICAL ORGANISATION, UNITED NATION ENVIRONNEMENT PROGRAM, 2003, *Climate change and Human Health – Risks and Responses*, Summary. Geneva.
- WILBY, R. L., DAWSON, C. W. et BARROW, E. M. 2002. «SDSM – a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts». *Environmental Modelling & Software*, 17: 147-159.

- WILTON, D et WIRJANTO, T. 1998. *An analysis of the Seasonal Variation in the National Tourism Indicators*. Ottawa, Canadian Tourism Commission
- YARNAL, B., COMRIE, A. C., FRAKES, B. et BROWN, D. 2001, « Developments and Prospects in Synoptic Climatology », *International Journal of Climatology*, 21: 1923-1950.
- ZHANG, X., HOGG, W. D. et MEKIS, E. 2001. «Spatial and temporal characteristics of heavy precipitation events over Canada», *Journal of Climate*, 14, 1923-1936.
- ZHANG, X., VINCENT, L., HOGG, W. D. et NITSOO, A. 2000. «Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century», *Atmosphere-Ocean*, 38(3).
- ZHU, X. B., COX, R. M., BOURQUE, C. P. A. et ARP, P. A. 2002. «Thaw Effects on Cold-Hardiness Parameters in Yellow Birch», *Canadian Journal of Botany – Revue canadienne de botanique*, 80: 390-398.
- ZISKA, L. H., BUNCE, J. A. et CAULFIELD, F. A. 2001. «Rising atmospheric carbon dioxide and seed yields of soybean genotypes», *Crop Science*, 41: 385-391.
- ZWIERS, F. W. et KHARIN, V. V. 1998. «Changes in the extremes of the climate simulated by the CCC GCM2 under CO₂ doubling», *Journal of Climate*, 11, 2200-2222.

LISTE DES FIGURES

1	Variation de la température à la surface de la terre dans l'hémisphère Nord entre les années 1000 et 2000 (GIEC, 2001)	3
2	Évolution des concentrations de CO ₂ , de CH ₄ et de N ₂ O entre les années 1000 et 2000 (GIEC, 2001)	4
3	Variations des températures observées et modélisées avec contributions naturelles et anthropogéniques (GIEC, 2001)	5
4	Évolution des émissions de GES par groupes de pays de 1971 à 1998 (GIEC, 2001)	6
5	Croissance des émissions et des concentrations selon divers scénarios du GIEC (GIEC, 2001)	7
6	Comparaison des émissions historiques et des scénarios d'émissions du GIEC et les réserves et les ressources d'hydrocarbures en milliards de tonnes de carbone (GtC). (GIEC, 2001)	8
7	Hausse des températures de 1990 à 2100, selon les scénarios du GIEC et divers modèles de simulation (GIEC, 2001)	9
8	Scénarios d'augmentation des températures et des précipitations pour le Québec pour la période 2080 à 2100 par rapport à la période 1960-1990 (Hulme <i>et al.</i> , 1999)	9
9	Différences de températures moyennes en °C pour les périodes 2010-2030 et 2080-2100 par rapport à 1975-1995. (Service Météorologique du Canada, Environnement Canada, 2000)	11
10	Les reliefs (Ressources naturelles Canada, 2002)	13
11	Les températures et précipitations moyennes annuelles au Québec de 1966 à 1996 (MENV, 1997)	14
12	Évolution de la population 1991-2051 (Bureau de la Statistique du Québec, 2000)	15
13	Les régions du Québec du point de vue des changements climatiques (Ouranos, 2002)	17
14	Le pergélisol (Allard et Séguin, 1987)	18
15	Gradient de la température des sols dans deux stations arctiques (Allard <i>et al.</i> , 2002)	19
16	Les zones forestières (Ressources Naturelles, Faunes et Parcs, 2003)	22
17	Le potentiel hydroélectrique (Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, 2003)	25
18	Apports annuels moyens des bassins versants aménagés de la zone Ressource (Hydro-Québec, 2003)	26

19	Les zones sensibles à l'érosion côtière (L'Atlas du Canada, 2003)	29
20	Débit du Saint-Laurent à Sorel, décembre 1932-décembre 2001 (Morin, J. <i>et al.</i> , 2000)	38
21	Emprise de la plaine d'inondation et profondeurs d'eau pour trois débits du Saint-Laurent (Morin, J. <i>et al.</i> , 2000)	40
22	Les régions hydrographiques du Québec (Atlas Picard, 1994)	43
23	Approvisionnement en eau du Québec : sources et usagers (MENV, 2002, 1999; Gouvernement du Québec, 1997)	43
24	Bilan énergétique du Québec (Ministère des Ressources naturelles, 2001)	46
25	Impact du réchauffement des températures sur la demande québécoise d'énergie des bâtiments résidentiels (Ministère des Ressources naturelles, 2003)	47
26	a) Dommages annuels dus aux ouragans aux États-Unis de 1950 à 1995 (Pielke et Landsea, 1998)	55
	b) Dommages annuels normalisés dus aux ouragans de 1925 à 1995 (Pielke et Landsea, 1998)	55
27	Impacts des changements climatiques sur la fréquence des événements climatiques extrêmes (Environnement Canada)	56

OURANOS

550, rue Sherbrooke Ouest
Tour Ouest, 19^e étage
Montréal, (Québec) H3A 1B9
Canada

Téléphone : (514) 282-6464
Télécopieur : (514) 282-7131

www.ouranos.ca